

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Civil

# Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física.

Edgar Filipe Duarte Tomé

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Civil de Geotecnia  
(elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil no  
âmbito do protocolo entre a FCT-UNL e o LNEC)

Orientador Científico: Professor Doutor João Bilé Serra

Monte da Caparica

2010



## Agradecimentos

A realização desta dissertação é o finalizar de um percurso académico com vários objectivos atingidos. Todo este caminho não seria possível sem o apoio e colaboração de diversas pessoas que me acompanharam ao longo deste tempo, a quem eu gostaria de expressar o meu sincero agradecimento:

- Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, na pessoa do seu Presidente Professor Carlos Pina pelas facilidades e pelas condições disponibilizadas para a elaboração da dissertação;
- Ao Departamento de Geotecnia, na pessoa da sua Directora Professora Laura Caldeira, pelo acolhimento no DG e pelas facilidades para a elaboração da dissertação;
- Ao Professor João Bilé Serra, por toda a amizade e paciência demonstrada ao longo destes anos e por toda a disponibilidade na orientação desta dissertação, no fornecimento de documentação, revisão e crítica deste trabalho e os inúmeros conselhos transmitidos;
- À Engenheira Joana Carreto, pela ajuda, disponibilidade e transmissão de conhecimento;
- Ao Mestre Raul Póvoa pela paciência e contribuições para a concepção do equipamento e pelo fabrico deste;
- A todos os técnicos de laboratório do Departamento de Geotecnia do LNEC, principalmente ao Jorge Veiga que me acompanhou e trabalhou comigo ao longo deste processo de aprendizagem, Fernando Rodrigues, Joaquim Remédios, Mário Mestre, António Cardoso, Fátima Carrim e ao Gil Rosa do Núcleo de Betões do Departamento de Materiais (DM/NB) pela grande ajuda nos ensaios;
- Aos pais, por todo amor, carinho, amizade, compressão e apoio ao longo destes anos, bem como todo o conhecimento e educação que me transmitiram ao longo da minha vida, tornando-me na pessoa que sou hoje;
- Ao meu irmão por todo o amor, carinho e a grande amizade que nos une ao longo destes anos a superar todas as dificuldades;
- À minha namorada por todo o amor, carinho e paciência para comigo, sempre a incentivar e a ajudar;
- Ao meus grandes amigos que estão sempre comigo e me ajudaram ao longo destes vários anos, com carinho e amizade, na faculdade e nas nossas grandes aventuras,

Sílvia Sousa, António Frederico Franco, Telmo Lopes, David Pinto, Alexandre Braz, Sofia Ribeiro, Joana Freitas;

- Aos meus amigos, por todo o companheirismo, carinho e amizade demonstrada ao longo destes anos, Mafalda Maçaroco, Rita Potier, Paulo Silva, João Cruz, Pedro Farias, Pedro Lagartixo, Rita Pereira, Nuno Dias, David Tiago, Tânia Godinho, Margarida Gomez, Ana Almeida, Marta Silva, Frederico Parreira, Carolina Parreira, Daniel Duarte, Miguel Abreu e a todos os meus colegas de curso.



## **Resumo**

O desenvolvimento de grandes estruturas geotécnicas ou a construção em solos com características desfavoráveis tem, particularmente nos últimos anos, conduzido à necessidade do desenvolvimento de novas técnicas de melhoramento do solo.

Uma das principais técnicas utilizadas é a injecção por permeação de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Esta técnica apresenta diversas vantagens, sendo de destacar, a versatilidade de aplicação em diversos campos, não apenas na construção de novas obras. Para além disso, pode ainda permitir corrigir e prevenir anomalias geotécnicas, sendo utilizada para redução da permeabilidade em zonas de ruptura do solo, aumento da rigidez e resistência, e compensação de perdas de volume.

Os objectivos desta dissertação são o desenvolvimento de equipamento e de um procedimento experimental, que possa recriar em laboratório as condições de injecção por permeação utilizadas no local, bem como a análise do sucesso da injecção por permeação para diferentes rácios de água/cimento de calda.

Para a realização dos objectivos propostos, foram desenvolvidas e testadas diversas soluções e equipamentos, de modo a recriar em laboratório a injecção por permeação utilizada no terreno.

No sentido de permitir sistematizar e recriar todas as condições de injecção por permeação, foram ainda desenvolvidos, quer um protocolo experimental, quer um plano de ensaios, de forma a estudar as características do solo utilizado antes e depois da injecção. Para obtenção da mais variada informação de solos injectados por permeação de caldas cimentícias em laboratório.

## **Abstract**

In the past few years there is been seen great development of large geotechnical structures as well as constructions built up in soils with poor characteristics, which lead to a growing need in developing new improvement of soil techniques.

Therefore, permeation grouting in sandy soils has been commonly used, as it allows wide applications in several fields. Also, with this technique is possible to correct and prevent geotechnical anomalies, being used for permeability reduction in areas where are present soil ruptures, increase the rigidity, resistance and compensation of volume losses.

The aim of this study is the development of appropriate equipment and experimental procedure, which can recreate in laboratorial conditions, solutions for permeation grouting used at the place, as well as the analysis of successful injections for permeation at different rate of water/cement.

In order to accomplish these goals, were developed and tested several solutions and equipments, in way to recreate permeation grouting used at the ground. Also an experimental protocol and a rehearsal plan were developed, in order to study the soil characteristics used before and after grouting. Thus, obtaining the most varied information on treated soils for permeation grouting in laboratory.

## Índice Geral

1	Introdução.....	1
2.	Resenha de Injecções de caldas cimentícias em terrenos (Estado da Arte) .....	3
2.1	Introdução .....	3
2.2	Conceitos para a realização de injecção de calda que correspondam às necessidades e as características dos solos .....	4
2.3	Técnicas de Injecção.....	5
2.3.1	Injecção por Permeação .....	6
2.3.2	Injecção com Fracturação Hidráulica.....	13
2.3.3	Injecção de Compactação (adensamento) .....	16
2.3.4	Jet grouting .....	22
2.3.5	Injecção de Compensação.....	27
2.4	Material / Equipamento .....	31
2.5	Caracterização de Caldas .....	34
2.5.1	Materiais.....	34
2.5.2	Caldas .....	35
2.5.3	Tipos de caldas .....	36
2.6	Análise do risco das Injecções de caldas cimentícias.....	38
2.7	Monitorização/Validação .....	39
3.	Estudo de trabalhos realizados em laboratório (Estado da Arte) .....	41
3.1	Introdução .....	41
3.2	Objectivos.....	41
3.3	“Real-scale miscible grout injection experiment and performance of advection-dispersion-filtration model” [4] .....	42
3.4	“A new laboratory apparatus for grout injection studies” [2] .....	45
3.4.1	“Pressure-controlled cavity expansion in clay” [3].....	52
3.5	“Mathematical model for bore-injected cement grout installations” [5] .....	52
3.6	“Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts” [6] .....	54

3.7	“Fracturing Pressure of soil ground by viscous materials” [7].....	56
3.8	“Engineering properties of grouted sands” [8] .....	60
3.9	“An advanced experimental set-up for studying a monodirectional grout injection process” [9].....	64
4	Programa Experimental .....	69
4.1	Equipamento desenvolvido .....	69
4.1.1	Interface de controlo de pressão .....	69
4.1.2	Controladores de pressão/volume .....	71
4.1.3	Câmara de Injecção .....	72
4.1.4	Ligações .....	76
4.2	Técnicas experimentais.....	76
4.2.1	Calibração do conbel.....	77
4.2.2	Sequência de ensaio.....	77
4.3	Materiais .....	80
4.3.1	Caracterização da areia .....	80
4.3.2	Caracterização da calda.....	85
4.3.3	Procedimento de preparação da calda cimentícia .....	87
5	Experiências realizadas.....	91
5.1	Injecção por permeação .....	91
5.2	Permeabilidade.....	95
5.3	Compressão diametral .....	97
5.4	Compressão isotrópica.....	99
6	Resultados.....	103
6.1	Ensaio da calda .....	103
6.2	Injecção por permeação .....	103
6.3	Permeabilidade.....	110
6.4	Compressão diametral .....	112
6.5	Compressão isotrópica.....	118

7	Conclusões.....	125
8	Bibliografia.....	127

## Anexos

Anexo I.....	I-1
Anexo II.....	II-21
Anexo III.....	III-45
Anexo IV .....	IV-47
Anexo V .....	V-57
Anexo VI.....	VI-61
Anexo VII .....	VII-63
Anexo VIII .....	VIII-65

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Técnicas de injecção de calda [1] .....	6
Figura 2.2 - Injecção por Permeação [1] .....	7
Figura 2.3 – Limites de injecção de caldas com base na permeabilidade dos solos [1] .....	9
Figura 2.4 – Injecção por permeação usada no escoramento de fundações.....	11
Figura 2.5 - Fractura Hidráulica [1].....	13
Figura 2.6 - Injecção de Compactação [1].....	17
Figura 2.7 - Injecção de Intrusão [1].....	18
Figura 2.8 - Injecção descendente: a) Bolbos descontínuos; b) Colunas de calda [1].....	20
Figura 2.9 - Aplicações de jet grouting: a) Reforço de fundações; b) Barreiras hidráulicas; c) Impermeabilização do terreno; d)Estabilização taludes; [1] .....	24
Figura 2.10 - Procedimento para forma coluna de jet grouting usando o processo triplo [1] .....	25
Figura 2.11 - As principais variantes do processo de jet grouting [1] .....	26
Figura 2.12 - Injecção de compensa na construção de um túnel [1] .....	28

Figura 2.13 - Corte da secção da plataforma de um túnel [1].....	29
Figura 3.1 - Esquema de injeção, dimensões em mm [4].....	43
Figura 3.2 – Curvas granulométricas do cimento e do solo [4].....	44
Figura 3.3 – Esquema da experimental de injeção de calda [2]. ....	46
Figura 3.4 – Detalhes do consolidómetro alterado [2] .....	48
Figura 3.5 – Detalhes do balão de látex [2] .....	49
Figura 3.6 – Esquema de injeção [5] .....	53
Figura 3.7 – Esquema de injeção [6]. ....	55
Figura 3.8 – Esquema de injeção de solos coesivos [7] .....	57
Figura 3.9 – Esquema de injeção em solos arenosos [7] .....	58
Figura 3.10 – Preparação de areias injectadas [8] .....	61
Figura 3.11 - Curva granulométrica das areias ensaiadas [8] .....	62
Figura 3.12 – Esquema da estrutura utilizada para experimentação [9].....	65
Figura 3.13 – Princípio de chuva de areia [9] .....	66
Figura 4.1 – Interface de controlo de pressão .....	69
Figura 4.2 – Membrana de divisão das câmaras do interface de pressão .....	70
Figura 4.3 – Tampa do interface de pressão .....	70
Figura 4.4 – Bolacha metálica no interior do interface de pressão.....	71
Figura 4.5 - Diagrama do layout do controlador .....	72
Figura 4.6 – Controladores de pressão/volume.....	72
Figura 4.7 – Base da câmara.....	73
Figura 4.8 – Topo da câmara.....	73
Figura 4.9 – Câmara .....	74
Figura 4.10 – Pedestal.....	74
Figura 4.11 – Injector .....	75
Figura 4.12 – Câmara de injeção montada.....	75
Figura 4.13 – Ligações do interface de pressão a câmara de injeção.....	76
Figura 4.14 - Esquema experimental de calibração do actuador hidráulico de força (AHF)..	77

Figura 4.15 – Esquema das ligações .....	78
Figura 4.16 – Amostra 4878 .....	81
Figura 4.17 – Amostra 4879 .....	81
Figura 4.18 - Granulometria da amostra 4878.....	82
Figura 4.19 - Granulometria da amostra 4879.....	82
Figura 4.20 – Câmara de ensaio preenchida com a amostra 4878.....	84
Figura 4.21 – Esquema de ensaio de permeabilidade de carga constante.....	85
Figura 4.22 – Bentonite Sódica natural [12] .....	86
Figura 4.23 – Cone de Marsh .....	89
Figura 4.24 – Proveta .....	90
Figura 5.1 – Esquema do ensaio.....	91
Figura 5.2 – Interface de pressão preenchido com calda ligado aos controladores .....	92
Figura 5.3 – Expulsão de calda pelo topo da câmara de injeção .....	92
Figura 5.4 – Câmara preenchida com solo e calda após a injeção .....	93
Figura 5.5 – Câmara superior do interface de pressão .....	93
Figura 5.6 – Topo do provete .....	94
Figura 5.7 – Base do provete .....	94
Figura 5.8 – Provete desmontado no tabuleiro.....	95
Figura 5.9 – Preenchimento da câmara de injeção com bentonite.....	96
Figura 5.10 – Câmara triaxial com provete.....	97
Figura 5.11 – Ensaio de compressão diametral .....	98
Figura 5.12 – Ensaio de compressão isotrópica.....	100
Figura 6.1 – Provete 23-11 .....	107
Figura 1 - Esquema experimental de calibração do actuador hidráulico de força (AHF) ...	V-57

## **Índice de Tabelas**

Tabela 2.1 - Técnicas de Injecção correspondentes tipos de terreno [1] .....	4
Tabela 2.2 – Escolha da calda para injecção por permeação [1] .....	9
Tabela 2.3 - Diferentes Tipos de Misturadoras [1] .....	32
Tabela 2.4 - Ensaio de Controlo da Calda [1] .....	32
Tabela 2.5 - Diferentes Bombas de Injecção [1] .....	33
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos solos coesivos [7] .....	59
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas dos solos arenosos [7] .....	59
Tabela 3.3 – Caldas injectadas [7] .....	60
Tabela 3.4 – Características das areias [8] .....	62
Tabela 3.5 – Caldas e solos arenosos injectados e respectivas renitências compressão [8]	63
Tabela 4.1 – Ensaio densidade das partículas .....	83
Tabela 4.2 – Caldas utilizadas .....	86
Tabela 5.1 – Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 1 .....	100
Tabela 5.2 - Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 2 .....	101
Tabela 5.3 - Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 3 .....	101
Tabela 5.4 - Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 4 .....	101
Tabela 5.5 - Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 5 .....	101
Tabela 6.1 – Resumo dos ensaios de injecção por permeação .....	104
Tabela 6.2 - Resumo da informação relevante dos ensaios de injecção .....	105
Tabela 6.3 – Descrição dos provetes .....	108
Tabela 6.4 – Provetes ensaiados .....	110
Tabela 6.5 - Resumo de resultados de permeabilidade .....	111
Tabela 6.6 – Provetes ensaiados .....	112
Tabela 6.7 - Descrição antes da compressão .....	113
Tabela 6.8 – Descrição após a compressão .....	115
Tabela 6.9 – Resultados dos ensaios .....	117



Tabela 6.10 - Provetes ensaiados .....	118
Tabela 6.11 – Resumo de resultados.....	121

## Índice de Gráficos

Gráfico 6.1 - Evolução da pressão ao longo do tempo do transdutor e controlador .....	106
Gráfico 6.2 - Evolução do volume e da pressão do controlador .....	106
Gráfico 6.3 – Relação de pressão do controlador com a pressão do controlador.....	107
Gráfico 6.4 - Evolução da resistência ao longo do tempo .....	118
Gráfico 6.5 - Evolução da pressão radial em relação ao índice de vazios do provete 25-9	122
Gráfico 6.6 - Evolução da pressão radial em relação ao índice de vazios do provete 29-13 .....	123
Gráfico 1 – Relação de força entre êmbolo hidráulico e AHF .....	V-58
Gráfico 2 – Relação de força entre AHF e pressão no pedestal .....	V-59
Gráfico 3 – Relação de AHF com célula de carga e êmbolo hidráulico .....	V-59
Gráfico 4 – Relação entre pressão pneumática e tensão vertical de confinamento.....	V-60

## Índice de Equações

Equação 4.1 – Índice de vazios.....	83
Equação 4.2 – Porosidade .....	83
Equação 4.3 – Densidade das partículas .....	83
Equação 4.4 – Exsudação.....	90
Equação 5.1 – Resistência à tracção .....	98
Equação 6.1 – Variação do índice de vazios.....	119
Equação 6.2 – Índice de vazios.....	119
Equação 6.3 – Resultado da equação 6.1 com a 6.2.....	119
Equação 6.4 – Índice de vazios final .....	119
Equação 6.5 – Resultado da equação 6.3 com a 6.4.....	119

Equação 6.6 – Índice de vazios inicial .....	119
Equação 6.7 - Declive da linha de compressão normal $\lambda$ .....	120
Equação 6.8 – Declive da linha de descarga-recarga k .....	120

# 1 Introdução

Esta dissertação contém o resultado do estudo e do trabalho desenvolvidos no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, que tem como base o conhecimento existente sobre as injecções e vários trabalhos já desenvolvidos em outros laboratórios, assim como a recriação de injecção de caldas cimentícias em solos arenosos.

Este trabalho teve como primeiro objectivo a montagem e o desenvolvimento de equipamento de injecção e o processo de desenvolvimento experimental laboratorial de injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos em condições controladas. Um segundo objectivo consistiu no desenvolvimento e realização dum programa experimental com variação dos factores que afectam a qualidade da injecção, seguido da análise dos resultados obtidos com as várias condições impostas.

A metodologia seguida para o desenvolvimento do trabalho presente nesta dissertação tem como base vários pontos de estudo e investigação, desenvolvimento de equipamento para injecção por permeação, montagem de processo experimental que possa ser repetido várias vezes sempre com as mesmas condições de trabalho alterando as variáveis em estudo, como o tipo de calda e de solo.

Os tópicos de desenvolvimento do estudo são os seguintes:

- investigação de injecção em solos;
- investigação de trabalhos desenvolvidos em laboratório de vários tipos de injecção em diferentes tipos de solos;
- desenvolvimento do equipamento de injecção em laboratório;
- montagem e calibração de procedimento experimental científico em laboratório;
- realização de ensaios de permeabilidade, compressão diametral e compressão isotrópica para obtenção de resultados relativos a eficácia da injecção por permeação.



## **2. Resenha de Injecções de caldas cimentícias em terrenos (Estado da Arte)**

### **2.1 Introdução**

Para o estudo da problemática das injecções é necessário considerar diversos factores, nomeadamente, as tipologias técnicas, o objectivo das injecções, as características do terreno, o equipamento utilizado, a pressão utilizada, bem com a composição e características físicas do fluído injectado.

De modo geral, a injecção de calda pode ser definida como um processo de injecção controlada, de um material temporariamente fluido, cujo endurecimento vem contribuir para o melhoramento das características mecânicas e hidráulicas do terreno.

O processo de injecção é definido e controlado por posicionamento remoto, através de bombagem de materiais no solo, cujas características estabelecem e ajustam factores como a pressão, volume e caudal da injecção [1].

O uso de injecção de calda tem sido amplamente diversificado, em particular nos últimos anos. Novas técnicas e controlos automáticos têm vindo a ser desenvolvidos. Com o surgimento de novas estruturas subterrâneas e das condições de execução das mesmas

A injecção pode ser usada com diversos objectivos, entre os quais se incluem:

- redução da permeabilidade do solo;
- contenção do fluxo de água e contaminação no solo;
- aumento da resistência do solo para melhoramento da resposta de fundações;
- aumento da resistência do solo para melhoramento da estabilidade de escavações;
- aumento da densidade do solo para prevenir liquefacção;
- levantamento de estruturas e pavimentos;
- escoramento de estruturas;
- estabilização do solo para facilitar escavações de túneis e poços;
- preenchimento de cavidades naturais e espaços adjacentes a estruturas.

## 2.2 Conceitos para a realização de injecção de calda que correspondam às necessidades e as características dos solos

O objectivo da injecção e a extensão influencia a escolha da técnica de injecção. A técnica de tratamento do solo dever ser concebida especificamente para cada projecto. A injecção de calda pode ser efectuada através de permeação, fracturação hidráulica, compactação, jet grouting. Perante algumas circunstâncias são admissíveis técnicas alternativas e a combinação de técnicas pode ser igualmente justificável. A Tabela 2.1 resume as diferentes técnicas de injecção e tipos de calda aplicáveis.

**Tabela 2.1 - Técnicas de Injecção correspondentes tipos de terreno [1]**

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Permeação</b>	<b>Compactação/ Fracturação Hidráulica/ Jet Grouting</b>
Cascalheira, Areia grossa e Cascalho arenoso $k > 5 \times 10^{-3}$ m/s	Suspensões puras de cimento; Suspensões compostas por cimento	Argamassas; Suspensões compostas por cimento
Areia, Areia media $5 \times 10^{-3}$ m/s $< k < 1 \times 10^{-5}$ m/s	Suspensões micro-finas; soluções	Suspensões compostas por cimento
Areia fina, Lodo (lodos argilosos) $5 \times 10^{-4}$ m/s $< k < 1 \times 10^{-6}$ m/s	Químicos específicos (fenólico, acrílica)	Argamassas compostas por cimento; Suspensões compostas por cimento

As variações de permeabilidade encontradas nos solos naturais são consideráveis, tornando essencial a existência e aplicação de diversos tipos de caldas e técnicas de injecção para um tratamento efectivo.

Para a aplicação de diversas técnicas de injecção de calda enquanto tratamento de solo, de acordo com as necessidades e tipo de calda. É necessário proceder a diversos ensaios ao solo e recolher a mais variada informação sobre as suas características litológicas, mecânicas e hidráulicas reunidas num modelo geológico-geotécnico, detalhes das estruturas adjacentes e os movimentos permitidos, acesso ao local entre outras.

Para o desenvolvimento do projecto e programação da injecção de calda, devem ser estabelecidos os principais objectivos: a redução de permeabilidade, modificação das propriedades mecânicas e a indução de deslocamentos para compensação de perda de volume. Para o desenvolvimento do projecto, são estabelecidos e aplicados critérios considerados fundamentais, tais como:

- conhecimento das características do solo a ser tratado;
- composição da mistura da calda e as suas propriedades durante o tempo de utilização;
- método de perfuração;
- técnicas, processos e métodos de aplicação da injecção;
- espaçamento e sequência das injecções;
- limites das características de injecção (pressão de injecção e quantidade de calda a ser injectada);
- ensaios de controlo;
- monitorização de controlo com base em instrumentação.

Durante o projecto e planeamento da aplicação da injecção da calda deve ser adoptada uma abordagem flexível, que possa adaptar-se à multiplicidade de condições e variações no comportamento dos solos encontrados durante o processo.

### **2.3 Técnicas de Injecção**

Cada uma das técnicas de injecção já referidas, possui características específicas e, por consequência diferente aplicabilidade. Deste modo, podemos dividi-las segundo dois grupos distintos de aplicação: a) sem deslocamentos ou substituição do solo que ocorre na permeação e injecção em maciços rochosos, ou b) com deslocamentos ou substituição do solo nas remanescentes técnicas de acordo com a Tabela 2.1 [1]. As principais diferenças entre estes grupos, residem nos respectivos objectivos, tipologia e equipamento de injecção utilizado, e nas características do solo.

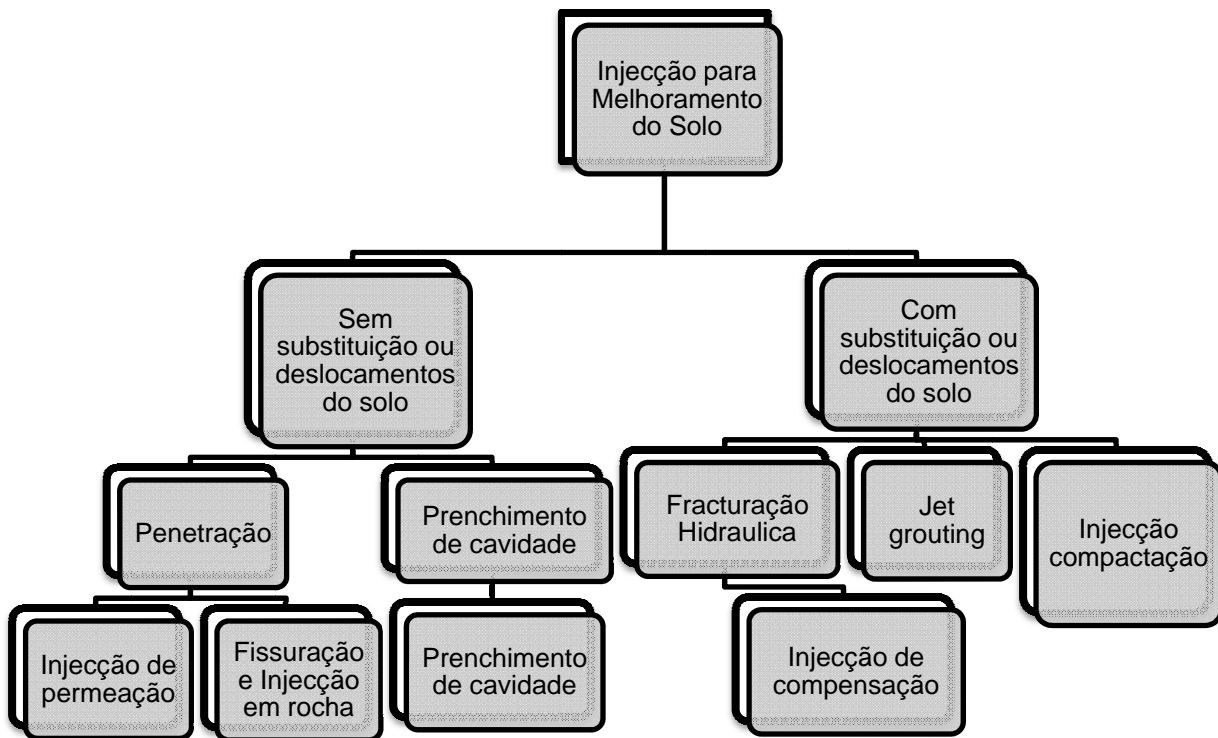


Figura 2.1 - Técnicas de injecção de calda [1]

### 2.3.1 Injecção por Permeação

A técnica de injecção por permeação é geralmente utilizada para aceder aos poros (acessíveis) em solos suficientemente permeáveis, sem que se destrua a sua estrutura. Desta forma reduz-se a permeabilidade do solo, permitindo um certo grau de controlo sobre o escoamento da água e conferindo, supletivamente, alguma resistência e rigidez, em função do sucesso da injecção [1].

A penetração da calda depende essencialmente da permeabilidade do solo, sendo geralmente utilizado para solo arenoso e cascalhento, assim como em discontinuidades, que possam ser injectadas com calda de baixa viscosidade.



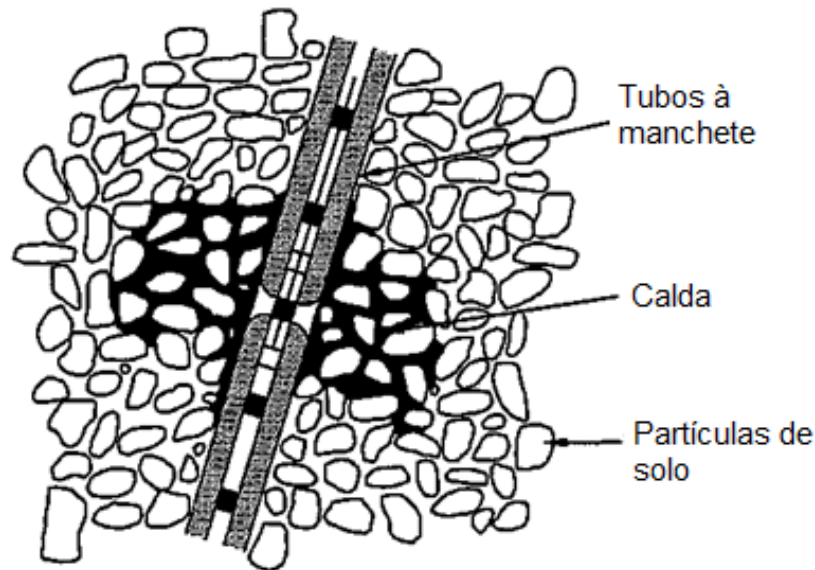


Figura 2.2 - Injecção por Permeação [1]

### 2.3.1.1 Aspectos Condicionantes da Injecção

Os parâmetros utilizados na execução de injeções por permeação são, a definição do volume de calda em relação ao volume de vazios, a injeção a baixas pressões em diferentes níveis de cota da perfuração.

#### Processo de Injecção

São utilizados tubos à manchete para injeção sequencial, tendo como vantagem ser possível re-injectar, e permitir a monitorização do volume e da pressão nos diferentes troços injectados.

A calda de baixa viscosidade é injectada no solo, preenchendo os vazios. A direcção que o escoamento toma é determinado pela distribuição espacial e ligação relativa dos poros. Para solos idealmente homogéneos, a calda dispersa-se de forma aproximadamente esférica ou radial. A heterogeneidade e anisotropia dos solos afectam a penetração da calda e sua dissipação, formando bolbos assimétricos [1].

A pressão é escolhida para permitir movimentos estáveis do fluido intersticial, de forma a prevenir a mistura da calda com este, ocorrendo geralmente uma incompleta substituição. A pressão utilizada não deve causar o desenvolvimento de altas pressões intersticiais no solo. Geralmente o processo de injeção é repetido no mesmo ponto para obter uma relativa distribuição uniforme para preenchimento dos vazios do volume. Por vezes é necessário recorrer a uma segunda ou até terceira fase de furos entre as posições da primeira fase, sendo um processo interactivo entre a posição, sequência, pressão e volume recorrendo-se ao método observacional para definição dos parâmetros de injeção.

## **Tipo de Calda e utilização**

A composição da calda deve permitir a sua penetração adequada nos vazios e descontinuidades, de modo a preenchê-los. Geralmente, são utilizadas caldas com composição diversa, inicialmente caldas mais baratas e de granulometria mais grosseira compostas por bentonite e cimento para o preenchimento dos vazios de maiores dimensões e de modo a atingir zonas de injecção mais afastadas, seguido por caldas mais dispendiosas, como sejam caldas com micro-cimento e caldas químicas para preenchimento dos vazios mais pequenos restantes.

De entre os parâmetros a ter em conta na escolha do tipo de calda e das proporções de mistura, destacam-se:

- a Viscosidade da calda: é necessária baixa viscosidade para deslocar os fluidos intersticiais, e percorrer a maior distância possível no solo. Caldas mais espessas obrigam a menor espaçamento entre pontos de injecções e menor taxa de bombagem, resultando grandes períodos de injecções e elevados custos;
- a dimensão das partículas do ligante cimentício: devem ser consideradas de forma a serem três a cinco vezes menores que as partículas que se encontram na zona envolvente do ponto de injecção, de forma a prevenir o bloqueio que possa ocorrer na filtração. A razão entre o diâmetro representativo do solo (por exemplo  $D_{10}$ ) e a dimensão média das partículas de cimento deve ser no mínimo de 3 a 5;
- a capacidade resistente: calda quando endurecida deve ter a adequada resistência para melhorar em geral as propriedades mecânicas do terreno após a injecção. Não é necessário um grande aumento da rigidez da calda para aumentar de forma considerável a rigidez e coesão do solo tratado. Geralmente, é preferível preencher um maior número de vazios com uma calda mais pobre do que injectar um volume reduzido de vazios com uma calda com melhores características [1].

Deve-se ter também em conta outros aspectos que possam influenciar as características da calda utilizada, tais como, a sua estabilidade física e química, composição e perigos químicos da calda que possam afectar o ambiente, assim como o método de injecção proposto e o material usado e seu custo e implantação. Na Tabela 2.2 está descrito a escolha de calda de acordo com o solo a ser tratado por injecção por permeação.

Tabela 2.2 – Escolha da calda para injecção por permeação [1]

Descrição do solo	Calda seleccionada
Cascalheira	Suspensão cimento - bentonite
Areia de cascalheira grossa	Suspensão cimento ultra-fina
Areia	Gel macio
Solo contendo significativo lodo	Não pode ser completamente selado através de injecção por permeação. Suspensões de cimento, gel de silicato de sódio e resinas podem ser usadas para o mesmo efeito.

Na prática, a permeabilidade do terreno é o parâmetro mais importante, para a escolha de injecção por permeação, conforme esquematizado na Figura 2.3, uma orientação preliminar para a escolha da calda apropriada para os diferentes solos e permeabilidades. Devido à dificuldade na injecção em solos com uma permeabilidade inferior a  $10^{-5}$  m/s, com caldas de bentonite-cimento, estas caldas são usadas na fase de pré-injecção, para preencher os vazios de grandes dimensões.

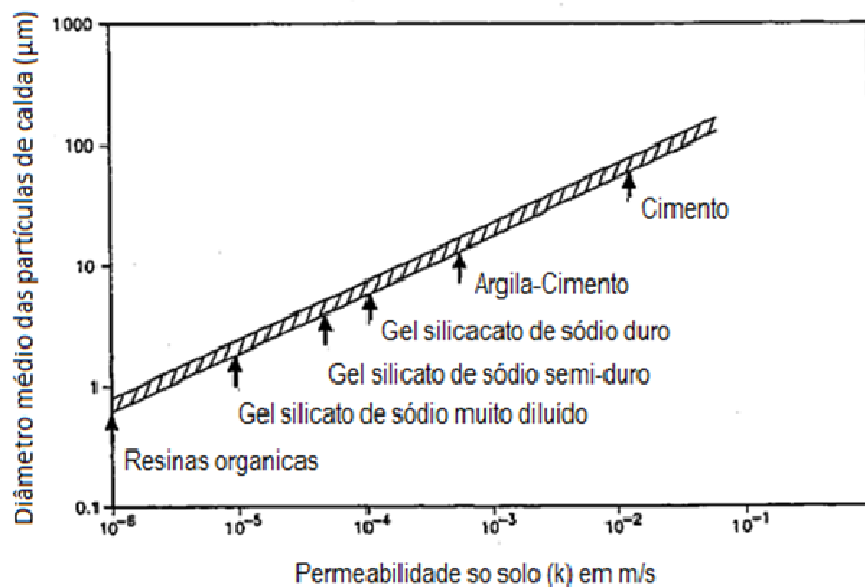


Figura 2.3 – Limites de injecção de caldas com base na permeabilidade dos solos [1]

### Equipamento

A injecção de calda por permeação, é do tipo selectivo utilizando tubos à manchete para injecção estável com razoável facilidade. Este equipamento é colocado com mangas que obturam os injectores, e um par de obturadores que são posicionados nos extremos do ponto de injecção e insuflados de forma a criar uma câmara de injecção. A calda é injectada na zona isolada de tubo à manchete após a pressão aumentar o suficiente para abrir a manga e franquear o acesso ao terreno.

### **2.3.1.2 Aplicações**

A principal aplicação é para obras em que se pretenda o controlo do escoamento de água subterrânea, e a não perturbação das estruturas adjacentes uma vez que não provoca deslocamentos significativos. Muitas vezes esta técnica é utilizada em associação com outras tais como fracturação hidráulica ou injecção de compactação. Se o principal objectivo for rigidificar e conferir um aumento de resistência a solos grosseiros, então deve ser utilizada outra técnica como o jet grouting, pois permite uma melhor cimentação entre as partículas. Para reduzir a permeabilidade é necessário ocupar o máximo de substrato heterogéneo permeável para ter um efeito geral, para o preenchimento de zonas abertas deve-se utilizar injecção por fractura hidráulica. Independentemente da técnica, deve ser escolhida a calda que tenha melhores condições para permear as zonas a serem tratados no solo [1].

Os vários campos de aplicação são:

- cortinas hidráulicas em escavações;
- barragens;
- obras de reparação de núcleos de barragens;
- escoramento de fundações como na Figura 2.4;
- fortalecimento do solo;
- redução assentamentos de estacas;
- assentamento de túneis com eixo abaixo do nível freático em solos grosseiros.

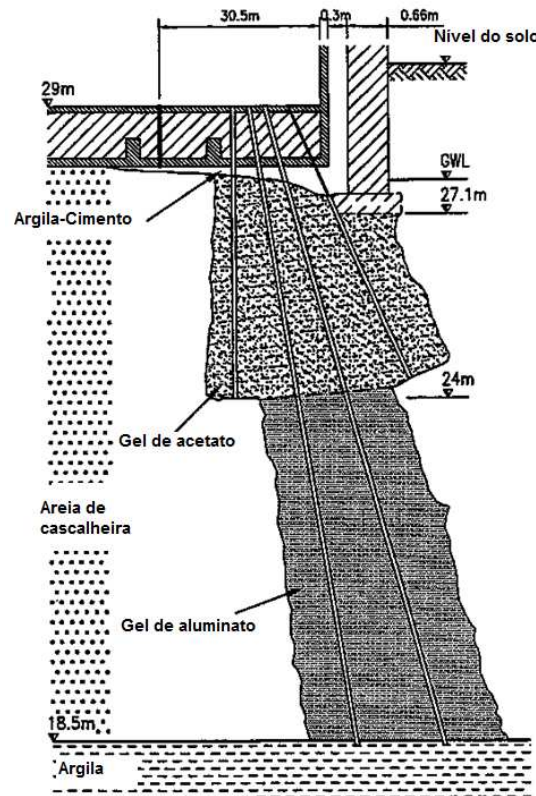


Figura 2.4 – Injecção por permeação usada no escoramento de fundações

### 2.3.1.3 Descrição da Técnica de Injecção

#### Técnica Usada

Para a selecção da melhor forma de execução da injecção, devem estar bem definidos os objectivos do projecto. Para tal, é necessário reunir a informação sobre as estruturas envolventes, estrutura do solo e sua distribuição granulométrica, permeabilidade e sua distribuição e variabilidade, localização e composição química das águas subterrâneas, o acesso ao local de intervenção e o tempo de vida útil do tratamento a efectuar [1].

Os projectos são realizados com base em parâmetros que são variáveis, como resposta às observações que são realizadas durante a execução das injecções, que podem implicar em alteração de algum dos critérios de execução. Na execução do projecto devem considerar-se todas as condicionantes do terreno e a realização de uma modelação do problema. Através de cada injecção realizada obtêm-se mais informação sobre as características do solo.

Os pontos de injecção são definidos com base nos parâmetros do solo, designadamente, a sua porosidade, granulometria, permeabilidade e experiência na realização. A escolha da localização das injecções selectivas usando tubo a manchete e o espaçamento das mangas, deve ser feita de forma que a calda se distribua uniformemente. Geralmente utilizam-se

modelos matemáticos, o que permite considerar todos os aspectos físicos e químicos do solo, visto que este não é uniforme, e assim definir as injeções. Usualmente utiliza-se um espaçamento de 1,2 a 1,5 metros. Menor espaçamento é utilizado para estruturas mais sensíveis que devem ser protegidas, resultando num maior número de injeções e um custo mais elevado.

Os parâmetros para injeção como a pressão, caudal e tempo, são definidos em conjunto com a localização, com base nos objectivos. A permeabilidade do solo deve ser analisada no local através de um ensaio de bombagem de água, usado para definir a consistência e a trabalhabilidade da calda. A pressão de referência para início da injeção da calda deve ser de 10 a 20 kPa por metro de profundidade, sendo alterado conforme as condições [1].

### **Ensaio prévios**

Na realização de grandes projectos, deve-se proceder a ensaios no local. Com base nos ensaios realizados em que se faz variar os diferentes parâmetros de injeção e respectiva monitorização, define-se se a técnica mais indicada para o objectivo pretendido e quais os parâmetros devem ser escolhidos.

#### **2.3.1.4 Limitações / Restrições**

O sucesso do processo de injeção por permeação depende do conhecimento da porosimetria do solo, pois pode ocorrer bloqueio devido a filtração das partículas de calda nos caminhos de permeação, podendo esta ocorrer repentinamente e impedir que a calda percorra a distância desejada desde o ponto de injeção.

A viscosidade da calda, que se desenvolve com a passagem das partículas da calda em caminhos muito próximos, restringe o caudal da calda.

Um dos principais parâmetros a ter em conta é a pressão de injeção da calda, pois pode causar fracturas no solo com o efeito contrário relativamente à permeabilidade e provocando efeitos sobre as estruturas adjacentes.

#### **2.3.1.5 Conclusão**

A injeção de calda por permeação, tem muitos factores que influenciam a sua escolha, tais como as características do solo e da calda utilizada, mas o mais importante é o objectivo do tratamento. A principal função é a diminuição da permeabilidade do solo, controlo e confinamento da água existente no solo, assim como um tratamento primário ao solo antes de injeção de calda com outras funções, conferindo um aumento de resistência e da compacidade.

### 2.3.2 Injecção com Fracturação Hidráulica

A técnica de injecção com fracturação hidráulica é utilizada para compactação do solo, realizando fracturas no solo pela percolação da calda sob pressão. Geralmente é utilizada para adensamento e rigidificação do solo, assim como acesso a vazios que de outra forma não eram acessíveis, reduzindo a permeabilidade [1].

Esta técnica pode ser utilizada para o levantamento de estruturas ou compensação de assentamentos causados por perda de volume, geralmente associado a execução de túneis atribuindo-se o nome de injecção de compensação. Neste caso, a injecção só é iniciada quando se verifica deslocamentos no solo, de forma a manter a cota de determinados pontos de controlo, dentro de bandas de variação seleccionadas. A injecção de compensação inclui a fracturação (para abrir caminho) e depois injecção de preenchimento com calda mais fluida seguida de calda mais densa. É importante ter em conta a diferença entre a injecção controlada e não controlada, pois pode provocar deslocamentos fortuitos nas estruturas envolventes.

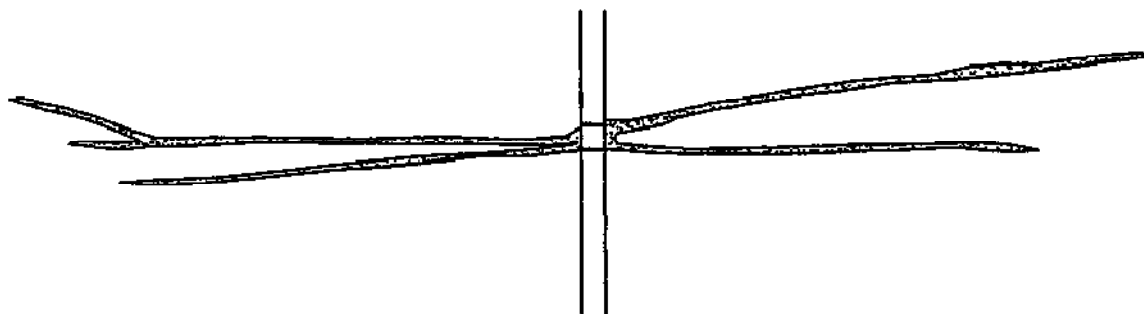


Figura 2.5 - Fractura Hidráulica [1]

#### 2.3.2.1 Aspectos Condicionantes da Injecção

##### Processo de Injecção

A pressão criada pelo fluido injectado altera o estado de tensão no solo causando novas fracturas ou duma descontinuidade já existente fechada no início da injecção. A calda preenche as descontinuidades e fissuras, propagando-se no solo na direcção de menor resistência. As fissuras deveriam ocorrer na direcção da menor tensão principal, mas devido à anisotropia do solo e, à pré-existência de fissuras ocorrem também segundo outras orientações. Em solos sobre consolidados o plano inicial de fraqueza é horizontal, nas injecções a calda tenta produzir fissuras na mesma direcção inicial ou aumento das já existentes.

A heterogeneidade do solo afecta a localização das injecções e a penetração da calda. A fracturação hidráulica permite o acesso posterior a um maior número de zonas permeáveis a partir de um ponto de injecção devido a fracturação do solo. O tratamento de solos heterogéneos reduz a permeabilidade do solo ocorrendo também um aumento de resistência.

### **Tipo de Calda e utilização**

Na execução de fracturação hidráulica a composição da calda inclui cimento ou produtos químicos, para preenchimento de fracturas, principalmente no tratamento primário, isto é no tratamento que provoca a fracturação do solo.

Pesquisas recentes mostraram que as fracturas se propagam em cerca de 20-40 m/s através do solo, e a velocidade de propagação está relacionada com o módulo de distorção e a resistência do solo. A pretensão de limitação da extensão da fractura é difícil [10]. No entanto um projecto cuidadoso das características e quantidade de calda injectada pode, por vezes, permiti-lo [1].

A utilização de calda de baixa viscosidade permite a realização de fissuras de pequenas dimensões, reduzindo a pressão ao longo desta e permitindo uma maior propagação. Para a criação/abertura de fissuras antes da injecção da calda, pode utilizar-se água. Calda de alta viscosidade é utilizada para aumentar as fissuras de grandes dimensões. A mistura de adjuvantes na calda, tem como objectivo a redução da quantidade de água, diminuindo o tempo de cura e o período de tempo entre as fases de injecção, e impedindo que a calda se distancie da zona de tratamento [1].

### **Equipamento**

O equipamento utilizado na injecção com fracturação hidráulica é o tubo à manchete, sendo recomendado para solos de características fracas, quando o controlo é necessário para obtenção de bons resultados. As bombas de calda devem ser capazes de gerar confortavelmente altas pressões (400 - 600 kPa, conforme as exigências concretas). Para esse fim, são utilizadas bombas de pistão assim como os acessórios específicos necessários.

#### **2.3.2.2 Aplicações**

A injecção com fracturação hidráulica, pode ser aplicada a solos com variadas características, principalmente a solos finos. As aplicações são variadas, tais como:

- redução da permeabilidade do solo, e reparação do núcleo de barragens;
- minimizar os assentamentos dos edifícios;



- regularização da cota do solo ou da soleira de edifícios;
- acesso a zonas permeáveis, de fundações de barragens ou de corpo de barragens de terra;
- controlo do movimento induzido por obras subterrâneas.

A utilização desta técnica poderá ser bastante mais económica que as restantes, pois pode utilizar um maior número de injeções e elevada pressão aplicada; no entanto, pode resultar em empolamentos não controlados com perigos inerentes. A fracturação hidráulica impõe consideráveis deslocamentos no solo, podendo ser aplicado para o nivelamento de fundações em colapso, compensação de perda de volume devido a realização de túneis e assentamentos de edifícios e distorções. Apesar da necessidade de elevadas pressões o número de injeções é pequeno, sendo que os movimentos ocorrem perto do local de injeção podendo ser controlado com pequenos riscos de empolamentos indesejados.

### **2.3.2.3 Descrição da Técnica de Injecção**

#### **Técnica Usada**

O sistema normalmente utilizado consiste num par de obturadores para limitar o espaço em torno de um conjunto de injectores próximos de modo a garantir que a fractura hidráulica se inicia na posição pretendida. Este sistema permite a re-injecção, se necessário. Os critérios de paragem da injeção são múltiplos tais como, quando é atingido nega da argamassa à pressão máxima permitida, mínima taxa de injeção que ocorre à pressão máxima permitida, assim como o volume pré-determinado de argamassa é injectada no solo. Um número sucessivo de injeções pode ser realizado no mesmo local, permitindo que a calda endureça [1].

Para a realização da injeção com fracturação hidráulica segue-se uma sequência: levantamento do estado preliminar das estruturas e dos níveis de águas subterrâneas, instalação de sistema de injeção, ensaios de injeção, execução controlada de injeção com fracturação hidráulica, por fim verificação das estruturas e dos níveis de águas subterrâneas.

Para a selecção da melhor forma de execução da injeção, é importante ter em conta a seguinte informação: características geológicas e geotécnicas, nomeadamente condições hidrogeológicas e a permeabilidade do solo, os valores admissíveis dos assentamentos e deformações das estruturas adjacentes ao local, o inventário das estruturas adjacentes e interferências subterrâneas e as condições, de acesso local para a execução.

A escolha da zona de injeção e de localização dos pontos depende do método do projecto e da facilidade de acesso aos pontos. Para estabilização ou levantamento de estruturas, as

injecções a grandes profundidades tem um desempenho uniforme e com melhor controlo dos deslocamentos. Injecções mais próximas da superfície, têm uma melhor relação de custo efeito, mas como a maioria dos casos não é possível para pontos de injecção muito profundos ou restrições a superfície, nestes casos é necessário um poço de acesso, na construção de túneis o mesmo princípio é aplicado.

### **Ensaio prévios**

Na realização de grandes projectos, é aconselhável a realizar ensaio do processo de injecção nas condições actuais do solo, monitorização das alterações registadas ao longo do tempo dos parâmetros do solo. O ensaio é usado para a validação e modificação dos parâmetros preliminares de injecção, permitindo a definição do projecto e selecção do equipamento e todos os parâmetros que são variáveis.

#### **2.3.2.4 Limitações / Restrições**

Na aplicação de injecção com fracturação hidráulica, existem limitações inerentes que devem ser sempre consideradas, tais como a incerteza da posição e orientação da fractura hidráulica, a dificuldade em determinar a quantidade e espessura das fissuras assim como falta de controlo da sua extensão e frequência. Determinação com confiança os parâmetros de injecção, devido a falta de correlações entre a quantidade de injecções, pressão entre outros parâmetros. Devido a todos estes aspectos é de grande importância a execução de ensaios no local para determinar relações empíricas entre parâmetros importantes. O sucesso da execução depende de uma resposta em tempo real, das análises retiradas das observações executadas ao longo do processo de injecção.

#### **2.3.2.5 Conclusão**

A injecção de calda por fractura hidráulica, tem muitos factores que influenciam a sua escolha, tais como as características do solo e da calda utilizada, mas o mais importante é o objectivo do tratamento. A principal função é o controlo dos deslocamentos do solo, compactação do solo, assim como compensação de perdas de volume que possam resultar de escavações realizadas, conferindo um aumento de resistência e diminuição de número de vazios.

### **2.3.3 Injecção de Compactação (adensamento)**

Injecção de compactação é a injecção de argamassa ou pasta tipo calda no solo para induzir deslocamentos controlados, estabilização, aumento de resistência e compactação do solo ou duma rocha fragilizada. A injecção de compactação tem um maior efeito nas zonas mais fragilizadas da massa do solo. A injecção de compactação contempla várias técnicas incluindo a compactação, intrusão e colmatação [1].

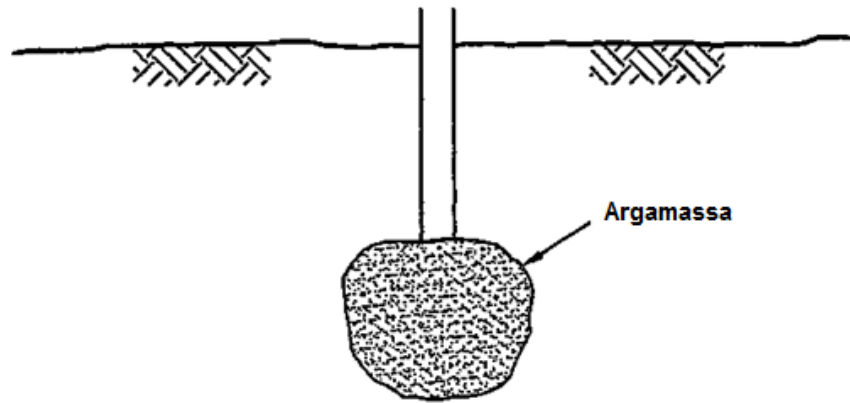


Figura 2.6 - Injecção de Compactação [1]

### 2.3.3.1 Aspectos Condicionantes da Injecção

#### Processo de Injecção

Na injeção de compactação as caldas mantêm-se homogéneas formando no solo corpos de elevada rigidez de forma aproximadamente esférica ou cilíndrica, conforme o procedimento escolhido. A massa de calda injectada aumenta continuamente com o decorrer da injeção. Eventualmente o aumento do volume ocupado pela calda ultrapassa a capacidade de compressão natural do solo, provocando deslocamentos significativos do terreno. A injeção da calda origina o desenvolvimento dum complexo sistema de tensão radial e tangencial desenvolvida no solo [1].

Por injeção de intrusão, designa-se uma técnica que é a combinação de injeção de compactação e injeção de fracturação hidráulica. As características do solo e reologia da calda permitem que o efeito de compactação possa ser atingido num limitado número de injeções de fracturação hidráulica. Está técnica envolve a injeção de calda muito fina e viscosa no solo. Geralmente é direccionada como uma barreira natural no solo ou na interface com estruturas no solo ou na envolvente. É utilizada em solos arenosos finos ou na interface de argilas e solos grosseiros. Na sua execução deve-se ter cuidado para prevenir o desenvolvimento de pressões intersticiais elevadas como resultado da sua compressão do terreno [1].

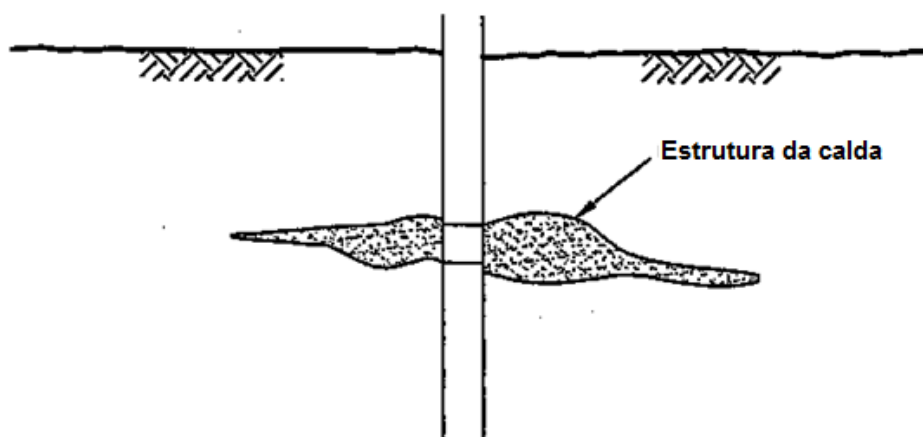


Figura 2.7 - Injecção de Intrusão [1]

A Injecção de colmatção envolve a injeção de calda de partículas finas em fracturas, para compactação ou consolidação do solo envolvente. Este processo é utilizado em zonas suficiente tensão vertical geo-estálce, para permitir a aplicação de injeções de alta pressão sem provocar extensas fracturas hidráulicas. O campo de aplicação é em solos e rochas em que os poros sejam muito finos, não permitindo, por isso, permeação ou fissuração.

### Tipo de Calda

A calda apropriada para compactação é definida pela ASCE como tendo um slump menor que 25 mm, podendo ser muito restritivo, geralmente é usado o intervalo de 25-50 mm. Tendo em consideração para a escolha da calda a pressão de injeção necessária, sem perda de fluido e fluidez. A escolha de calda com slump superior a 50 mm, leva a fissuração do solo e formação de patamares em vez de bolbos. O slump ideal é de 30 mm com uma tolerância de  $\pm 20$  mm [1].

São usadas caldas com partículas pesadas, geralmente compostas por areias de granulometria definida e siltes, assim como aditivos anti-segregação. As duas considerações mais importantes a ter são a granulometria da areia e a consistência da calda. A granulometria da areia, que deve ser natural e rodada, 100 por cento da massa deve passar pelo peneiro de 2,4 mm, e não existir mais de 20 por cento de grãos mais finos que 50  $\mu\text{m}$ . Quanto a consistência da calda, a misturadora deve ser frequentemente observada e realizado o ensaio slump regularmente para a sua monitorização de acordo com a prática consagrada na BS 1881.

### Equipamento

Na injeção de compactação é necessário equipamento especializado devido a utilização de pastas muito espessas. A misturadora deve ter a capacidade de misturar uniformemente, caldas espessas de baixo slump em grandes quantidades. Como exemplo a utilização de

pás de mistura de betão, com parafuso sem fim. Como alternativa, se a pasta for pré-misturada, pode recorrer-se a uma misturadora côncava.

A bomba necessária para a injeção de compactação deve ter as seguintes características:

- capacidade para calda de baixo slump;
- capaz de trabalhar a elevadas pressões (4 a 7 MPa) sem criar picos de pressão;
- bomba com capacidade de atingir caudal até 20m<sup>3</sup>/h, ajustável durante a injeção;
- bomba funil com um mecanismo de alimentação de força;
- caudalímetro apropriado as condições;
- registo de pressões no ponto de injeção.

Para a injeção de compactação geralmente também são usadas como alternativa bombas de calda tipo pistão, contudo bombas com grande impulso e elevado volume por impulso devem ser evitadas porque podem provocar fractura hidráulica. A calda usualmente deve ser transportada da bomba para o ponto de injeção por tubos com 38-50 mm de diâmetro, para impedir o seu bloqueio, os tubos devem ser tão curtos quanto possível porque a rigidez e o atrito da calda provocam grandes perdas de carga dentro do tubo [1].

### **2.3.3.2 Aplicações**

A injeção de compactação tem várias aplicações, sendo a principal a prevenção de problemas de assentamentos. A vantagem desta técnica é que pode ser usada em espaços confinados e de acesso reduzido. A utilização de pastas espessas ou caldas devem permanecer perto do ponto de injeção, sendo assim controlada a localização da calda. As zonas de tratamento a grandes profundidades também podem ser realizadas.

A injeção de compactação pode ser utilizada:

- controlos de problemas de assentamentos a superfície ou a grandes profundidades;
- prevenção de liquefacção sísmica;
- compensação de assentamentos em túneis;
- tratamento de zonas como solução para problemas futuros, prevenção de subsidência;
- prevenção e resolução da ruptura de tubagens no solo.

### 2.3.3.3 Descrição da Técnica de Injecção

#### Técnica Usada

Para a realização de injecção de compactação existem duas metodologias diferentes, que dependem do objectivo pretendido, podendo ser predominantemente compactação do solo ou predominantemente a inclusão de corpos rígidos de calda no solo.

A injecção de calda pode ser realizada para formar inclusões discretas no solo ou sobrepor fases numa furação para formar uma coluna de calda. Geralmente, é usada injecção ascendente ou descendente de calda, dependendo a escolha dos requisitos do projecto e das condições do terreno.

Para melhoramento da densidade do solo a preferência é a injecção descendente: é realizada inicialmente o tratamento das camadas superiores reduzindo os deslocamentos, e permitindo a utilização de grandes pressões de injecção nas fases subsequentes. Para cada fase de injecção é necessária nova furação. É necessária a selagem da base do revestimento e a furação deve ser realizada até a base da primeira injecção. Com um intervalo de tempo é realizada na furação a segunda injecção, criando assim uma coluna e calda ou uma serie de bolbos.

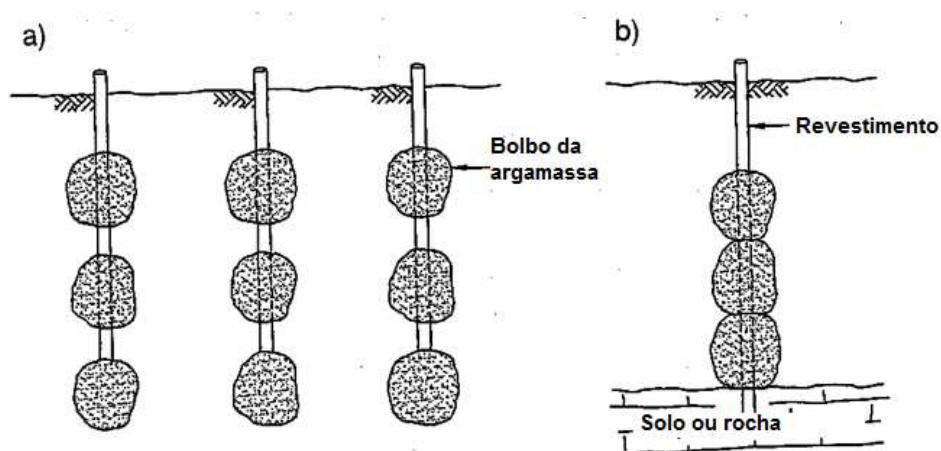


Figura 2.8 - Injecção descendente: a) Bolbos descontínuos; b) Colunas de calda [1]

A injecção ascendente, é usada para grandes profundidades que se pretendam tratar com apenas uma fase de furação utilizando revestimento. É importante selar a base da furação. A calda é injectada de forma faseada ou o revestimento é retirado acompanhado a injecção formando-se assim uma coluna de calda. Devido aos solos não serem tratados, à superfície a pressão de injecção tem de ser menor quando se aproxima desta. Podem, por isso ser necessários mais pontos de injecção a superfície para compensar a menor pressão de injecção.

A utilização de injecção de compactação tem como base a informação relativa aos parâmetros do local em termos geológicos e geotécnicos, como o tipo de solo, densidade e estrutura, permeabilidade a sua variação e distribuição, a vida útil do resultado do tratamento.

A localização e o espaçamento dos pontos de injecção dependem do terreno a ser tratado, da profundidade e dos requisitos do projecto. A análise e a observação do local indicam o tamanho da zona de tratamento dependendo da restrição de pressão do solo, da estrutura a suportar, da área de superfície do bolbo da calda e da pressão. Na maioria dos casos o espaçamento horizontal das injecções é maior em zonas de elevada sobrecarga, utilizando elevados volumes de calda e pressões. Em solos pouco densos as injecções provocam grandes bolbos sendo necessário maior espaçamento horizontal que em solos mais densos. A grelha de injecções e a sequência são normalmente designadas como primária, secundária e terciária, sendo cada fase realizada no espaço intermédio da fase anterior.

### **Ensaio prévios**

Para projectos muito grandes é recomendado ensaio de injecção nas condições do terreno e sua avaliação, permitindo modificações dos parâmetros, calda, localização e sequência de injecção. Os ensaios devem também demonstrar se a injecção de compactação é a técnica mais apropriada para o projecto.

#### **2.3.3.4 Limitações/restrições**

A injecção de compactação pode ser usada na maioria de solos grosseiros, mas não é apropriada para solos argilosos existindo a possibilidade de ocorrer deslocamentos. Os solos argilosos não serão compactados se estiverem saturados, ocorrendo deslocamentos devido à injecção da calda. É de difícil avaliação o resultado do projecto de injecção de compactação com as técnicas geotécnicas existentes.

Para o processo de injecção é necessário equipamento especializado para a mistura, bombagem e injecção de pasta, assim como o material de monitorização tem de ser cuidadosamente calibrado. As caldas bastante espessas são preparadas e injectadas com equipamento de elevadas pressões, podendo ocorrer problemas relativos ao atrito da calda no interior das tubagens.

Pode ocorrer fracturação hidráulica caso sejam cometidos erros na selecção da calda e método de injecção. A injecção de compactação exige perfuração para ocorrer o processo de injecção, pelo que quando se torna necessária injecção prolongada, o método pode ser dispendioso em comparação com outros métodos.

### **2.3.3.5 Conclusão**

A injeção de compactação tem muitos factores que influenciam a sua escolha, tais como as propriedades do solo e da calda utilizada e o objectivo do tratamento. Tem duas técnicas distintas com tratamento diferente no solo, assim como a utilização de uma calda mais rica, que permite conferir aumento de resistência ao solo podendo ter a forma de bolbos ou de colunas.

### **2.3.4 Jet grouting**

O jet grouting é um processo geotécnico especial que foi inventado no Reino Unido e desenvolvido no Japão. Esta técnica tem como característica a erosão da estrutura natural do solo através de elevadas pressões da água e jactos de calda, e o resíduo de solo pode ser misturado com a calda e parcialmente, removido e substituído por calda. Após o tratamento, obtém-se uma massa sólida, relativamente impermeável, muitas vezes interligado em colunas de calda ou painéis permitindo:

- melhoria das características físicas do terreno, reduzir a permeabilidade, aumento da resistência e da rigidez;
- a constituição duma barreira;
- a contenção de contaminantes no interior da estrutura calda-solo [1].

#### **2.3.4.1 Aspectos Condicionantes da Injecção**

##### **Processo de Injecção**

As colunas de jet grouting são geralmente formadas pela rotação e levantamento da vara conforme a calda é injectada. As colunas são terminadas antes de se aproximar da superfície. O volume pretendido de solo injectado pode ser obtido por sobreposição de numerosas colunas. Podem formar-se também painéis ao remover o jetting com pouca rotação ou mesmo sem rotação [1].

Esta técnica é muito versátil, podendo tratar-se com ela solos de tipos diversos, tais como argilas brandas, areias, lamas, argilas espessas e solos laminados. Problemas em zonas críticas nos vários estratos do solo podem ser tratados através de injeção entre níveis discretos.

##### **Tipo de Calda e utilização**

O processo de jet grouting quebra a estrutura do solo e mistura a calda com as partículas do solo ou substitui-as pela calda, não existindo restrições geotécnicas ao tamanho das partículas da calda; raramente é necessário usar caldas químicas.



A utilização mais comum é com caldas cimentícias simples, compostas apenas por cimento, os rácios de água e cimento normalmente situam-se entre os 0,5 e 1,5. Os factores determinantes para a selecção da calda são a resistência, permeabilidade ou rigidez pretendidas para o terreno tratado. Naturalmente, estas propriedades não serão as mesmas que em caldas limpas, devido a mistura parcial e substituição que ocorre.

### **Equipamento**

O equipamento inclui, para além da misturadora de calda e do sistema de bombagem, um anel de perfuração, um anel de jet grouting e tubagem para elevadas pressões de fluidos.

No processo de jet grouting utiliza-se uma sonda modificada com um monitor de jet grouting montado na ponta. Esta perfuradora cria uma furação em que o fluido cortante e a calda são injectados através das válvulas no monitor. Quando são atingidos estratos rígidos ou fundações uma perfuradora convencional é usada para uma pré-furação. Idealmente o elemento tratado é realizado em apenas uma fase de injeção. Quando tal não é possível devido a restrições ou elevadas profundidades, deve ser projectado com menos fases de injeção possível sobrepondo-se as secções de calda adjacentes [1].

O sistema de injeção define o tipo de equipamento utilizado. Para a injeção simples consiste num tubo oco com um ou mais embocaduras de injeção na ponta. Para a injeção dupla a calda é contida num tubo e o ar comprimido preenche o espaço entre um tubo e a parede do outro. A calda no interior da manga de ar é injectada através de uma duplo bocal. A injeção tripla utiliza um tubo triplo concêntrico. Este contém um tubo de água posicionada entre o tubo de ar e envolvido pelo tubo de calda. Neste caso, a calda é injectada através de um bocal separado abaixo do jacto de água envolto em ar, o diâmetro do bico injector tem grandes variações, sendo necessário ter em atenção ao aumento da pressão se o diâmetro for muito pequeno.

#### **2.3.4.2 Aplicações**

O jet grouting é uma técnica de tratamento de solo muito adaptável, que pode ser usada para uma larga variedade de aplicações tanto para tratamentos temporários ou permanentes. Geralmente não é necessária grande planta de intervenção, podendo ser usada em zonas de espaço limitado, tendo como aplicação:

- execução de fundações em estruturas a serem edificadas;
- escoramento de fundações existentes e estruturas;
- barreiras horizontais e verticais para fluxo hidráulico;
- formação de contenções ou paredes de suporte;
- solidificação e contenção de contaminação no solo;

- estabilização de aterros;
- obras de reparação de barragens, represa ou cortinas ensecadeiras;
- emboquilhamentos de túneis.

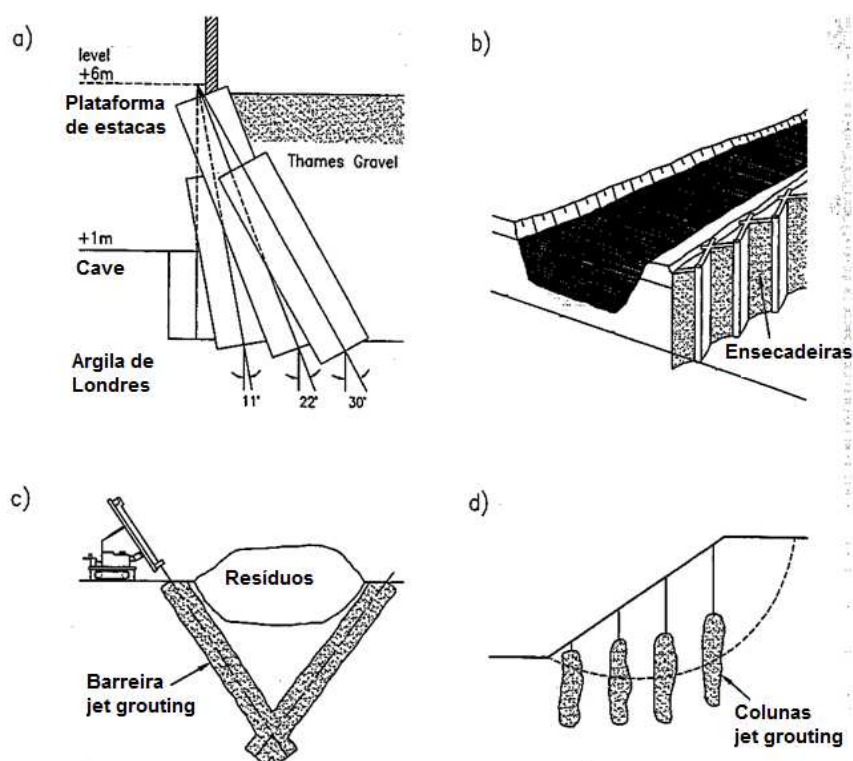


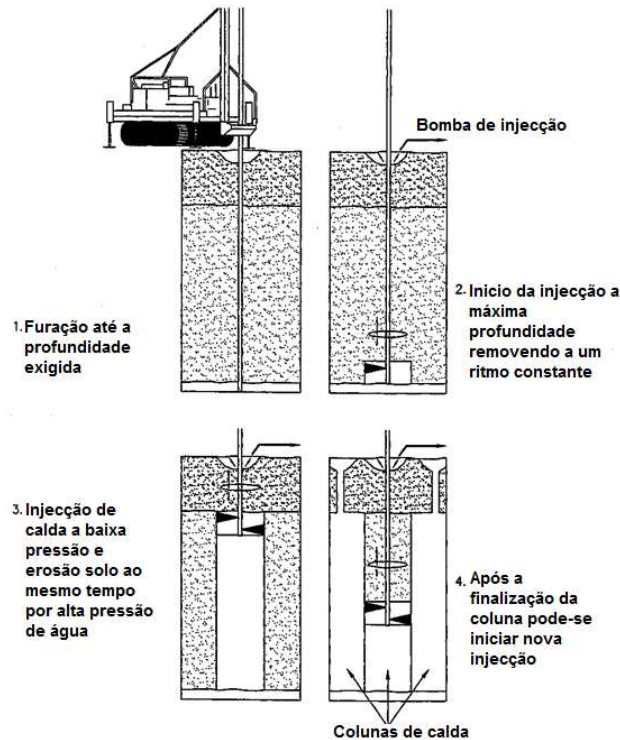
Figura 2.9 - Aplicações de jet grouting: a) Reforço de fundações; b) Barreiras hidráulicas; c) Impermeabilização do terreno; d) Estabilização taludes; [1]

### 2.3.4.3 Descrição da Técnica de Injecção

#### Técnica Usada

A primeira fase no jet grouting é a furação do furo de injecção com 100-200 mm de diâmetro. O tubo de injecção geralmente faz parte do equipamento de furação sendo colocado à profundidade desejada para a base da coluna de cimento e solo. Em solos de condições difíceis pode ser necessário recorrer a pré-furo.

A injecção do fluido a alta pressão tanto de calda como de água e calda, provoca erosão do solo em volta da furação, misturando ou substituindo o solo erodido. O levantamento e rotação da vara de calda produzem uma coluna de cimento ou solo-cimento, representado na Figura 2.10. O equipamento de jet grouting é posteriormente movido para outra localização e repetido o processo, ocorrendo intersecção de elementos de calda adjacente [1].



**Figura 2.10 - Procedimento para forma coluna de jet grouting usando o processo triplo [1]**

Existem três tipos de injeção de jet grouting, representados na Figura 2.11, que são:

- processo simples de injeção: a calda é injectada no solo a elevadas pressões (até 60 MPa) por um ou mais bicos injectores de 5-10 mm diâmetro num tubo de aço oco. A injeção de calda erode o solo e a calda mistura-se com este. O excesso de solo e lama de calda é forçado a subir pelo anel entre o tubo de injeção e o tubo que envolve a furação até à superfície;
- processo duplo de injeção: é extensão do anterior, sendo que a injeção de calda é envolvida em ar comprimido com 0,2-1,5 MPa. Um maior volume de solo é tratado, a manga de ar aumenta a capacidade de corte da injeção;
- processo triplo de injeção: este sistema usa injeção de água envolvida em ar para erosão do solo e um bocal separado para injeção de calda. Um tubo triplo concêntrico é necessário para a injeção de ar, água e solo, a pressões típicas de 0,2-1,5 MPa e 0,5-3 MPa respectivamente.

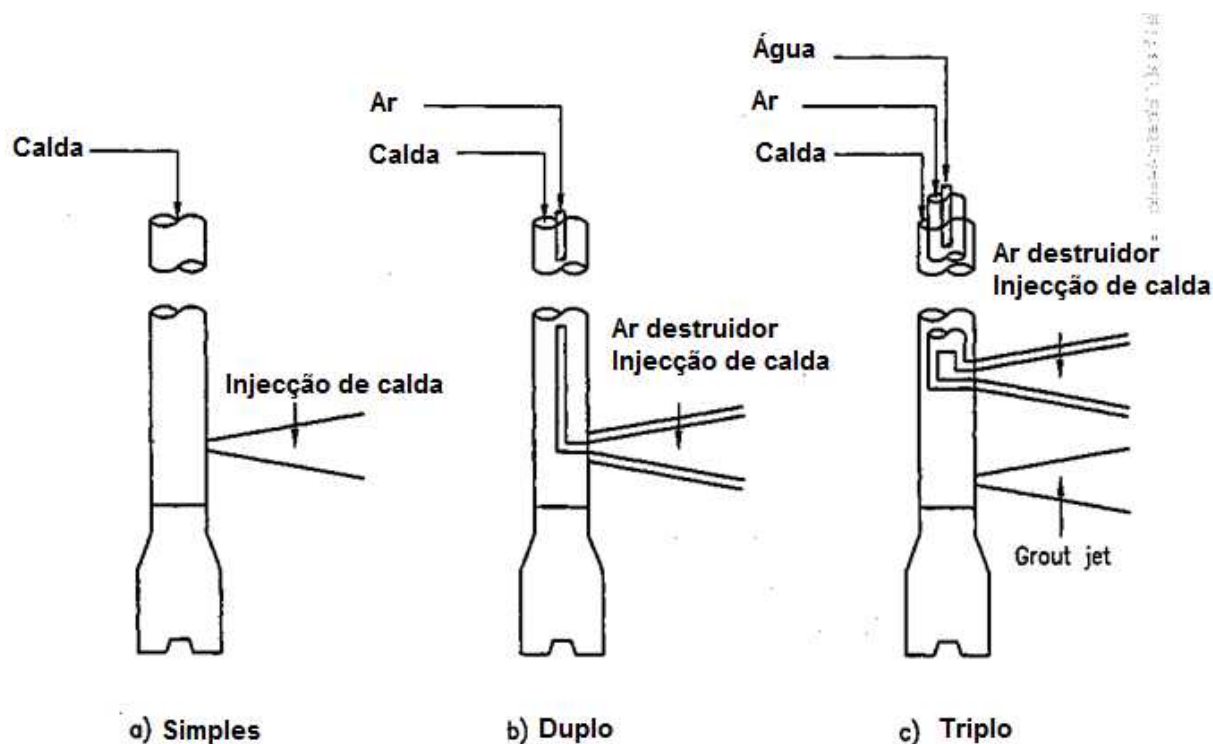


Figura 2.11 - As principais variantes do processo de jet grouting [1]

O diâmetro da coluna de calda injectada depende do processo de jet e do tipo de solo e erosão, pressão de injeção do jet, rotação e velocidade de levantamento. A resistência da coluna final é função das características da mistura de calda, a quantidade de solo e calda misturada e tipo de solo.

Para a definição e selecção desta técnica é preciso obter a mais variada informação, características geológicas e geotécnicas, existência de estruturas adjacentes e serviços, requisitos para a eliminação de líquidos, condições hidrogeológicas, possibilidade de deslocamentos e assentamentos de estruturas a superfície e adjacentes, acesso ao local.

A localização dos pontos de injeção depende do requisito para as dimensões do elemento final de calda, em particular a sobreposição de zonas adjacentes de injeção. Um exemplo é a mínima espessura de calda numa parede ou barreira. Certos projectos de fundações podem ter a necessidade que a furação seja preenchida por cimento, sendo necessário recorrer a sobreposição de colunas de injeção adjacentes. É então necessário um planeamento cuidadoso da sequência de injeção para permitir a cada coluna tempo para curar antes da injeção de zonas adjacentes.

### Ensaio prévios

O ensaio preliminar de jet grouting em terreno similar é aconselhável, deve ser projectado para se obter o máximo de informação e confirmar os parâmetros críticos, como o rácio de extracção para produzir o diâmetro da coluna específico. Idealmente deveria ser construído

vários elementos de calda e escavados posteriormente, para permitir inspecção visual do elemento injectado. Os ensaios permitem determinar a mistura de calda mais indicada, a razão de extracção, e a quantidade de danos que é o mais importante da técnica de injecção.

#### **2.3.4.4 Limitações/restrições**

Na técnica de jet grouting existem três importantes restrições:

- é necessário manter o controlo do processo jet grouting de forma a minimizar ou eliminar o levantamento do solo, que pode provocar estragos nas infra-estruturas enterradas, estruturas adjacentes ou fundações;
- o refluxo pode ser bloqueado, através da injecção continua podendo ocorrer fracturação hidráulica;
- grandes quantidades de refluxo podem ser produzidas, já que uma unidade de jet grouting produz até 50 m<sup>3</sup> de refluxo por turno, sendo que 30 por cento do volume é material sólido, dependendo do solo e do processo de jet grouting seleccionado [1];
- as propriedades químicas da calda utilizada que pode provocar reacções químicas no solo e agregações ao meio ambiente;
- a percolação de água no solo não permitindo a sua retenção na zona a tratar;
- solo composto por cascalheira sem matriz.

#### **2.3.4.5 Conclusão**

A injecção de jet grouting tem muitos factores que influenciam a sua escolha, tais como as propriedades do solo e da calda utilizada e o objectivo do tratamento. Existem três técnicas distintas que têm tratamento diferente no solo, variando o tipo de material injectado sequência e pressões utilizadas, permitindo a construção e colunas de calda umas mais resistentes que outras e ate sobrepostas conferindo um aumento de resistência ao solo e as fundações de estruturas a superfície. Através do desenvolvimento da técnica de jet grouting resultou no jet autoportante que permite a aplicação de elevadas pressões e a utilização de armadura descendente.

#### **2.3.5 Injecção de Compensação**

Injecção de compensação é a utilização correspondente de injecção de compactação, permeação ou fractura hidráulica na intervenção entre as estruturas existentes e uma operação de engenharia, em particular escavação de túneis. O objectivo é compensar o movimento do solo que possa afectar as estruturas existentes [1].

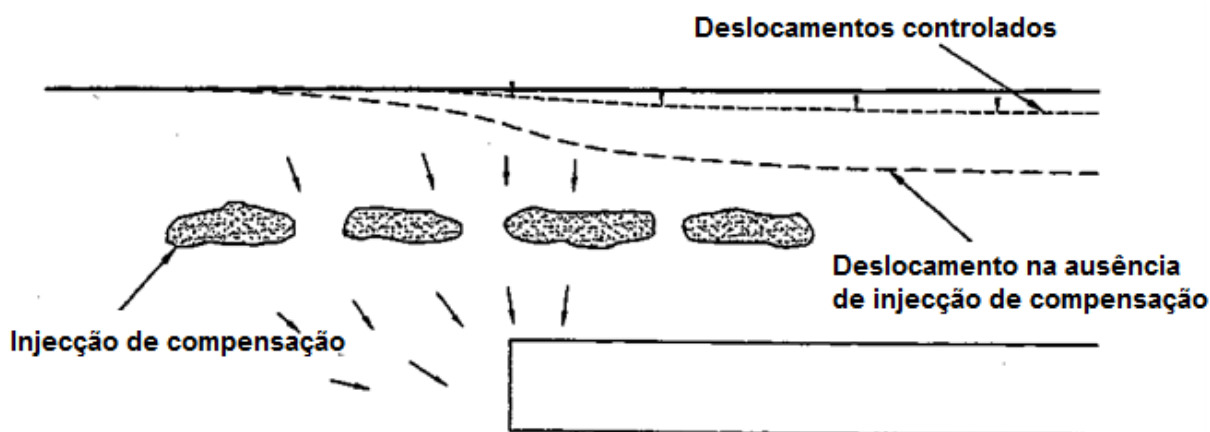


Figura 2.12 - Injecção de compensação na construção de um túnel [1]

### 2.3.5.1 Aspectos Condicionantes da Injecção

#### Processo de Injecção

Na construção de túneis ou escavações, o libertar da tensão ocorre na envolvente do solo, causando perdas de volume na direcção frontal do túnel ou em escavações associado a movimentos da superfície do solo e deslocamentos das estruturas. Nestes casos, a injeção de compensação é usada para corrigir a perda de volume, reduzir o movimento do solo e prevenir ou limitar os assentamentos das estruturas e do solo. Este procedimento utiliza um número variado de técnicas de injeção (fractura hidráulica, permeação, compactação e intrusão) para a zona de alívio de tensão ou entre essa zona e as estruturas adjacentes.

Na prática a injeção de compensação é uma sucessão de pequenos levantamentos no decorrer de perda de volume. Durante a fase inicial a injeção de compensação a menor tensão principal é reinstalada através da pressão de injeção. Caso a injeção só ocorra depois do assentamento então é necessário o levantamento, através da recompactação e aplicação de tensão em excesso da tensão principal. Precaver os assentamentos através da monitorização do solo e injeção antes de a estrutura ser afectada é preferível mas nem sempre possível [1].

#### Tipo de Calda e utilização

O tipo de calda depende da técnica que é utilizada, sendo que para injeção de permeação, fractura hidráulica e compactação, cada uma destas tem as suas próprias características, conforme referido anteriormente neste capítulo. Os limites de slump para as caldas geralmente usadas na injeção de compensação são 150/200 mm [1].

## Equipamento

O tipo de equipamento e aplicação varia conforme a técnica utilizada, podendo ser injeção de permeação, fractura hidráulica e compactação, utilizando diferente tipo de equipamento e aplicação, conforme referido anteriormente neste capítulo.

O controlo através do computador tem sido rapidamente desenvolvido para uso no processo de injeção de compensação. O sistema permite definir a máxima pressão e mínimo fluxo para cada ponto de injeção, avisos visuais e sonoros são dados no caso de algum dos parâmetros definidos atingir os máximos níveis pré-estabelecidos. O sistema de computador apresenta os parâmetros a cada ponto de injeção, sendo possível ao operador responder de forma rápida a alguma observação e ajustar manualmente os parâmetros de controlo, podendo estar ligado também ao software de monitorização de movimentos do solo e das estruturas.

### 2.3.5.2 Aplicações

A ilustração de injeção de compensação é representada na Figura 2.12 relativa a escavações no solo. A principal utilização desta técnica é a compensação de deslocamentos causados pela escavação de túneis ou outro tipo de escavações abaixo da superfície conforme na Figura 2.13.

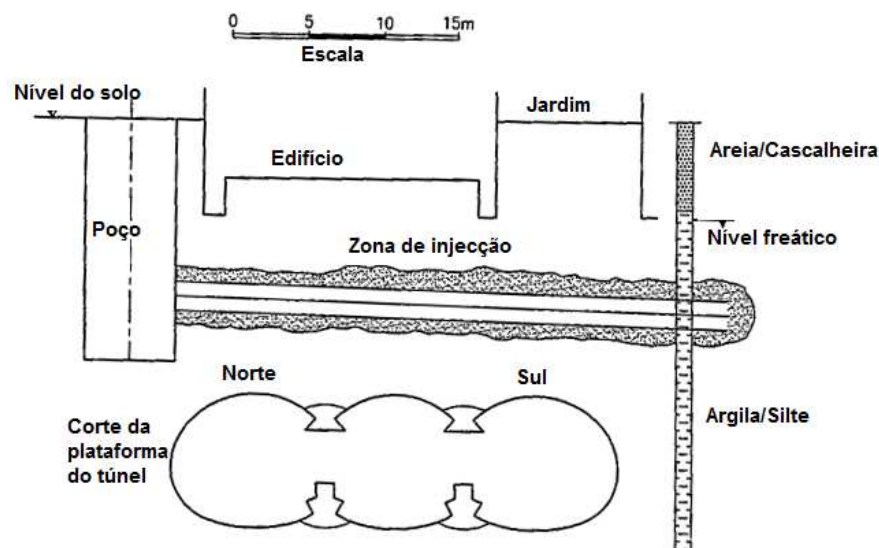


Figura 2.13 - Corte da secção da plataforma de um túnel [1]

### **2.3.5.3 Descrição da Técnica de Injecção**

#### **Técnica Usada**

A injecção de compensação é um procedimento que usa um ou mais dos seguintes processos, injecção de permeação para condicionamento do solo antes da injecção de compensação, injecção com fracturação hidráulica, injecção de intrusão e injecção de compactação, anteriormente referidas neste capítulo. A escolha do processo de injecção depende das condições do solo, objectivo do trabalho, limitações do local e os resultados pretendidos.

Para a realização da injecção de compensação é necessário recolher informação para além da que geralmente é necessária para a técnica que se vai usar, sendo:

- o rácio da escavação do túnel ou do trabalho de escavação;
- estimativa da perda na zona frontal;
- controlo dos assentamentos;
- distorção do solo permitida;
- distorção estrutural permitida;
- área de estruturas que necessitam de protecção;
- geometria do túnel e das fundações dos edifícios;
- perfil do solo.

A localização dos pontos de injecção e os parâmetros estão relacionados, sendo determinados geralmente pelo projecto, condições do solo e restrições estruturais. Os parâmetros a serem estabelecidos são as condições iniciais e finais do solo, mistura da calda, pressões de injecção a atingir, estabilidade das estruturas adjacentes, o acesso ao local e o custo. Um grande afastamento entre os pontos de injecção pode reduzir o custo das perfurações, em detrimento do aumento das pressões de injecção, volume de calda e uniformidade do tratamento.

#### **Ensaios prévios**

Os ensaios do processo de injecção são importantes para avaliação e optimização dos parâmetros de injecção, da técnica e da localização dos pontos de injecção. É particularmente importante a relação da quantidade e rácio de levantamento do solo para os parâmetros de injecção, ajudando assim o controlo o processo de injecção de compensação.



#### **2.3.5.4 Limitações/restrições**

A técnica de injecção de compensação pode ter custos elevados, mais que outras formas de injecção ou métodos que produzem os mesmos efeitos. A necessidade de vários pontos de injecção pode ser um problema em áreas urbanas, assim como a injecção pode aumentar a pressão na escavação ou na face do túnel e parte inferior.

#### **2.3.5.5 Conclusão**

A injecção de compensação é utilizada no controlo dos deslocamentos devido a perda de volume, sendo utilizadas várias técnicas de injecção relativas as condições. Conforme a técnica de injecção escolhida, utilizam-se os parâmetros e condições correspondentes à técnica seleccionada. A injecção de compensação é utilizada em grandes e complexas obras de engenharia em profundidade, para controlo dos deslocamentos e assentamentos.

### **2.4 Material / Equipamento**

#### **Furação**

Para o acesso ao local de injecção é essencial a execução de furações, para o que se recorre, sondas rotativas, de percussão ou uma combinação de ambas. Existem várias soluções, tais como:

- sonda rotativa;
- sonda por roto-percussão utilizando um martelo externo ou de fundo furo;
- sonda por roto-percussão fechada (sistema duplex);
- varas dirigidas;
- furações com grampo, escopro e balde (ferramenta de cabo);
- condução vibratória de tubo de encamisamento ou tubos furadores [1].

No decorrer da furação para a injecção de calda, alguns parâmetros podem ser registados, tais como a taxa de penetração, pressão do fluido, caudal, velocidade de rotação, torque, peso no obturador e comprimento do furo.

#### **Mistura da calda**

Para a mistura da calda de injecção, têm de ser considerados diversos aspectos, nomeadamente os relativos, à sensibilidade à temperatura e à humidade das componentes das caldas, é necessária cautela na sua recepção e armazenagem.

A escolha de cada componente para a preparação da calda, deve ter em conta as tolerâncias comportamentais admissíveis para cada tipo de mistura, as quais devem ser estabelecidas, segundo a certificação tecnicamente válida.

A realização da mistura da calda tem como objectivo a obtenção das características pretendidas, das quais a mais importante e obrigatória, a sua homogeneidade. Para o caso de uma calda com melhor penetrabilidade, deve ser utilizada uma misturadora de elevado rendimento para reduzir o tamanho das partículas constituintes. As caldas com tempo de presa curto devem ser misturadas tão próximo quanto possível do ponto de injecção.

A bentonite a utilizar nas caldas devem ser acrescentada à mistura final já dissolvida em água e numa proporção adequada para o traço final.

Para injecções sem interrupções, deve ser colocado um tanque de armazenamento da calda entre a misturadora e a bomba de injecção, o tanque de ser mantido em agitação estável para evitar a presa antecipada da calda.

Para a escolha da misturadora deve-se ter em conta os materiais constituintes da calda, como esquematizado na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Diferentes Tipos de Misturadoras [1]**

<b>Tipo de misturadora</b>	<b>Materiais de caldas</b>
Misturadoras ou turbo - misturadoras a elevadas rotações de 1500-3000 rpm	Caldas cimentícias; partículas ultra-finas de calda
Bomba misturadora em circuito fechado com tanque misturador e turbo - britador	Combinação de calda em grandes quantidades
Lâmina misturadora com velocidade de 30 – 200 rpm	Caldas químicas
Pistola misturadora	Resinas em pequenas quantidades

No decurso dos trabalhos devem ser realizados ensaios de controlo da qualidade e consistência da calda. Na Tabela 2.4 resumem-se esses ensaios, especificamente para cada tipo de calda considerada.

**Tabela 2.4 - Ensaio de Controlo da Calda [1]**

<b>Suspensões</b>	<b>Caldas micro - finas</b>	<b>Soluções (caldas químicas)</b>	<b>Argamassa</b>
Densidade	Densidade	Densidade	Densidade
Cone Marsh, Viscosidade	Granulometria	Tempo de cura	Trabalhabilidade
Tempo de cura	Viscosidade	PH dos componentes	Rácio de Água : Sólidos
Exsudação	Exsudação	Temperatura	
	Colunas de ensaio de areia		

## Bombagem

O sistema de bombagem de condução utilizado para injeção de calda deve resistir à máxima pressão de bombagem com um elevado factor de segurança, de acordo com a técnica de injeção utilizada. A tubagem deve ter um diâmetro que permita grandes caudais, de forma a evitar a desagregação dos seus constituintes ou o aumento excessivo da viscosidade.

Para a escolha das bombas de injeção devem ser considerados o caudal e as pressões atingíveis, para precaver facturação hidráulica onde não se pretende que ocorra.

Na escolha das bombas de injeção a utilizar devem ser escolhidas com base na informação da Tabela 2.5, tendo em conta a função do objectivo do tratamento.

**Tabela 2.5 - Diferentes Bombas de Injecção [1]**

<b>Tipos de Bombas</b>	<b>Aplicações</b>
Bomba Centrífuga Saída 10-50 m <sup>3</sup> /h	Injecção de grandes vazios a baixa pressão com caldas expandidas (com ar) ou argamassas
Bomba Parafuso Saída 10-20 m <sup>3</sup> /h	Injecção de grandes vazios a baixa pressão com caldas expandidas (com ar) ou argamassas
Bomba de Pressão ou Piston Saída 0,1-1,5 m <sup>3</sup> /h Pressão 0,5-10 MPa Ajustável a saída	Bomba padrão para a injeção a pressão controlada de: Argamassa de areias finas (d <2mm) Suspensão de partículas Soluções químicas Caldas de silicato
Bomba Parafuso Saída 0,1-1 m <sup>3</sup> /h	Injecção de caldas químicas
Piston bomba doseadora	Injecção de resinas
Pistola	Para pequenos volumes, injeções localizadas para a maioria do tipo de caldas

## Injecção

Ao longo deste capítulo foi referenciado a utilização de obturadores para a realização de injeção. Os obturadores são instrumentos que permitem isolar um troço do furo onde são colocados de modo a restringir espacialmente o processo de injeção, já que evita a migração longitudinal da calda ao longo do furo. Podem ser colocados apenas no topo do furo, isolando a parcela do furo posterior ao obturador, ou podem ser colocados no topo e no fundo do troço a injectar, designando-se de obturador duplo.

Os obturadores podem ser passivos, ou activos/expansivos por efeito mecânico ou pneumático. Os obturadores tendem a prover um selo apertado entre a parede do furo e o tubo de injecção, mesmo sob a máxima pressão de injecção. Na utilização de obturadores, deve ser instalado um sistema de limpeza para remover a calda que se escoar por extravasão através dos obturadores. O comprimento mínimo entre válvulas Manchete é de aproximadamente 1 m e o máximo entre 3 e 5 m.

A injecção da calda pode ser feita através de vários instrumentos, destacando-se a utilização da cabeça do obturador, tubo à manchete e varas guiadas ou vibradas.

O tubo à manchete é utilizado na injecção de calda em solos, é constituído por um tubo com vários pontos de injecção, com igual espaçamento cada um envolvido por uma manga de borracha que funciona como válvula de injecção que se abre por sobre-pressão, e por um sistema de obturadores duplo.

A introdução do tubo à manchete faz-se após a sustentação do furo por uma calda de cimento-bentonite, ou por um material plástico de baixa resistência. Este método tem como principais vantagens a estabilidade do furo, a possibilidade de re-injecção.

A injecção através da ponta do obturador é empregada quando o fluido de injecção utilizado é baseado em caldas de cimento. Consegue-se, assim, injectar maiores caudais, tornando o tratamento menos moroso. Como desvantagens a injecção sem observação e a pressões inferiores, em comparação com os outros métodos de injecção.

## **2.5 Caracterização de Caldas**

### **2.5.1 Materiais**

As caldas podem ser constituídas por diversos materiais. Os materiais que constituem as caldas podem ser divididos em ligantes hidráulicos e cimentos, minerais de argila, areia, seixo e inertes, produtos químicos e adjuvantes, água e outros componentes. Os elementos de uma calda devem reagir bem entre si, devendo ser garantida a sua compatibilidade com o solo a tratar.

Os ligantes hidráulicos compreendem todos os cimentos e produtos idênticos utilizados em suspensões aquosas. Em termos de granulometria existem ligantes hidráulicos que variam, sendo que os ligantes hidráulicos micro-finos são aqueles que se caracterizam pelo tamanho das partículas  $D_{95}$  menor que  $20\mu\text{m}$ . Para a escolha do ligante hidráulico deve ser tida em conta a sua curva granulométrica, conforme a dimensão dos vazios ou das fissuras a injectar [1].

Os minerais de argila são geralmente utilizados em caldas de cimento para reduzir a segregação e a filtração preferencial de certos constituintes sob pressão, com a finalidade de alterar as propriedades reológicas da calda e para melhorar a sua estabilidade, através da variação da viscosidade e da coesão da calda. Devem ser determinados os minerais existentes, o tamanho das partículas, e o limite de liquidez das argilas.

Com frequência são utilizadas areias e outros inertes nas caldas de cimento ou suspensões de argila como materiais de aumento de volume ou inertes, alterando a consistência, a resistência à segregação ou a resistência mecânica e a deformabilidade.

A utilização de adjuvantes, orgânicos ou inorgânicos, tem como objectivo fundamental modificar as propriedades das caldas e controlar os parâmetros como a viscosidade, o tempo de cura, a resistência, a coesão e a permeabilidade após a aplicação.

A água a utilizar deve ser ensaiada e aprovada, em particular em relação à presença de cloretos, sulfatos e matéria orgânica.

### **2.5.2 Caldas**

As caldas podem ser classificadas como suspensões, coloidais, soluções, pastas e argamassas, por ordem crescente da dimensão das partículas que as constituem. A escolha da calda deve ter em consideração as propriedades inerentes, tais como reologia (viscosidade, coesão, etc.), tempo de presa, estabilidade, tamanho das partículas, tensão, durabilidade e toxicidade [1].

As suspensões contêm partículas de menor dimensão do que as soluções podendo ser caracterizadas por, distribuição granulométrica das partículas sólidas, razão água/partículas sólidas, taxa de sedimentação e segregação, capacidade de retenção de água sob pressão de filtração, propriedades reológicas e comportamento ao longo do tempo. Deve-se ter em consideração a possibilidade de ocorrência de floculação (especialmente em suspensões micro-finas) e de assentamento da parte sólida quando em suspensão em água.

As soluções não contêm na sua maioria partículas sólidas, embora em alguns casos possam conter impurezas. Os compostos existentes após atingirem presa gelificam. As soluções unicamente inorgânicas utilizadas na injecção de calda, são soluções aquosas de silicato de sódio e reagente inorgânico. Especial atenção deve ser conferida aos seguintes aspectos: toxicidade dos componentes individuais de resina da calda, risco de diluição da calda pelas águas subterrâneas levando ao prolongamento do tempo de presa ou mesmo à inibição da reacção química, toxicidade de qualquer substância libertada para a água subterrânea se a reacção química não for totalmente concluída ou for modificada pelo meio a tratar.

As argamassas e pastas com elevado atrito interno são utilizadas no método de compactação de solos ou preenchimento de vazios. Quando da sua utilização na técnica de compactação de solos, a calda deve ter pelo menos 15% de finos passados num peneiro de abertura 0,1 mm. Este tipo de caldas para preencher vazios, fissuras largas e abrir fendas e espaços vazios em solos grosseiros através do peso próprio. Através de ensaios de trabalhabilidade é controlado o comportamento reológico.

A temperatura influencia o comportamento da calda, sendo necessário respeitar as indicações de aplicação.

### **2.5.3 Tipos de caldas**

Existem diversos tipos de calda, sendo as principais as caldas de cimento, de silicato e as resinas. Neste caso o estudo das caldas de cimento é mais aprofundado.

#### **Caldas de cimento**

A caracterização das caldas pode ser feita pela sua razão água/cimento e pela razão massa seca/água. São utilizadas essencialmente para fortalecer os solos e para criar barreiras hidráulicas.

Este tipo de calda tem como principais vantagens a sua estabilidade, durabilidade, facilidade de preparação e utilização, baixo custo sendo constituídas por materiais amplamente disponíveis no mercado. As caldas podem ser suspensões de cimento, caldas de cimento-argila/bentonite, caldas com inertes e caldas de cimento especiais.

No caso de caldas de suspensões de cimento instáveis, são utilizados aditivos químicos, estáveis ou semi-estáveis, tendo geralmente uma razão água/cimento compreendida entre 1 e 2,5.

No caso das caldas de cimento especiais, podem ser caldas com melhoria na penetração, resistência mecânica e resistência à segregação. Também podem ser caldas de presa rápida com endurecimento controlado, caldas em espuma, caldas expansivas ou gaseificadas. Para obtenção de caldas de presa rápida é necessário recorrer a aditivos. As caldas expansivas podem atingir o dobro do seu volume inicial, após a injecção da calda. No caso das caldas gaseificadas pode atingir cerca de metade do volume inicial, recorrendo a adição de ar à mistura através de um agente saturado [1].

Deve-se ter em consideração a estabilidade de uma calda com o objectivo de evitar sedimentação ou segregação do cimento durante a sua aplicação, reduzir as perdas de água, aumentar o tempo de presa, melhorar a penetração e obter uma mistura coloidal homogénea, de modo a garantir as adequadas propriedades reológicas.

A proporção de cada componente da mistura varia consoante o objectivo do tratamento. Quando é necessário grandes quantidades de calda para preenchimento de vazios e para condições mais difíceis e mais agressivas são utilizados inertes para substituição do cimento, tais como cinzas volantes e pozolanas, alterando os parâmetros da calda como a viscosidade e redução do custo.

Devido à variedade de tamanhos das fissuras ou vazios a preencher a penetrabilidade é uma característica muito importante. Para uma melhor penetrabilidade para preencher vazios pequenos ou fissuras estreitas, devem ser utilizados na preparação das caldas materiais com partículas de menores dimensões, aditivos para reduzir a viscosidade e aumentar a resistência aos efeitos de filtração pela utilização de agentes dispersores, para dispersar os grãos da calda e ainda, polímeros de retenção de água em água intergranular.

A composição química da água pode afectar as caldas de cimento, nomeadamente, a presença de cloretos, sulfatos e matéria orgânica, pelo que é importante determinar a sua presença na água utilizada e na água do terreno.

### **Silicato**

As caldas de silicato são caracterizadas por várias propriedades, a sua densidade está relacionada com a razão de sílica e soda, apresenta uma viscosidade inicial que resulta da quantidade de silicato, no decorrer do tempo de presa ocorre mudança de viscosidade, assim como a possibilidade de controlo do tempo de presa (sendo ajustável pelo tipo de químico e quantidade de reagente adicionado ao silicato). Durante o processo de presa ou no final ocorre expulsão de água, a resistência necessária ao arrastamento por água subterrânea só após ocorrer presa [1].

Através da variação do tipo e concentração dos componentes, é possível obter caldas de grande variedade reológica e características mecânicas, permitindo diferentes aplicações. Dependendo da concentração de silicato na calda, existem dois tipos de geles, o gel brando e gel duro.

O gel brando é obtido através de caldas que têm uma menor concentração de silicato, sendo geralmente obtido pela adição de reagentes minerais (bicarbonato de sódio e alumínio de sódio). Esta calda tem um curto tempo de utilização (seis meses), sendo utilizado geralmente para trabalhos temporários. A baixa viscosidade deste gel permite injeção em areias finas.

O gel duro é obtido através de caldas com elevada concentração de silicato e reagentes orgânicos. Esta calda apresenta uma maior viscosidade, e equilíbrio entre a resistência e a sua penetrabilidade no solo.

## **Resinas**

As resinas são soluções de produtos orgânicos, podendo o solvente ser aquoso ou não aquoso, capazes de formar um gel com características mecânicas específicas, em condições normais de temperatura e num ambiente fechado.

As resinas existem em duas formas, diferenciadas pelo modo de reacção ou endurecimento, polimerização ou policondensação. Geralmente o tempo de presa é ajustável, sendo controlado pela proporção de reagentes ou componentes introduzidos.

As resinas são caracterizadas por diferentes propriedades tais como, viscosidade muito baixa, rápida obtenção de elevada resistência mecânica, tempo de presa ajustável, resistência a águas agressivas. A reacção com águas subterrâneas pode criar situações de elevada toxicidade [1].

## **2.6 Análise do risco das Injecções de caldas cimentícias**

Na avaliação da injecção de calda para melhoramento do terreno devem ser igualmente ponderadas as limitações inerentes a cada processo, e a especificidade das várias situações.

Na avaliação a realização desta técnica e dimensionamento da injecção, deve-se ter em consideração vários aspectos, como:

- objectivos da aplicação da calda e dos critérios de controlo;
- ajustar a injecção de acordo com a informação recolhida do solo, em particular a permeabilidade, dados geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos;
- ter em apreciação as questões ambientais, a influência da presença de estruturas adjacentes em profundidade e a superfície;
- análise de projectos de injecção de calda realizados na mesma área ou em condições análogas.

Através da informação preliminar recolhida é possível avaliar qual o tipo de injecção que mais se apropria aos objectivos e as características do terreno.

A injecção de calda pode muitas vezes compreender riscos de impacto ambiental e a introdução de deslocamentos ou esforços no solo, com consequências para estruturas existentes.

A avaliação do risco de impacto ambiental associada à utilização da técnica de injecção de calda deve ter em conta a poluição do solo aquando da limpeza do equipamento utilizado. Estando sob intempéries a aplicação e deterioração de caldas de composição química, pode



libertar produtos químicos para os aquíferos. Neste sentido, devem ser tomadas precauções prévias à realização da injeção, através da obtenção de informação das condições do solo existentes. Podem ser aplicadas acções preventivas, tendo em atenção aspectos como a velocidade, direcção, efeitos e duração esperados das águas subterrâneas.

As medidas de segurança introduzidas e apreciadas, devem ter em atenção o risco de acesso ou de proximidade de pessoas à obra e a sua salvaguarda. Devem ser utilizados materiais e vestuário de segurança, como medidas de precaução em relação à toxicidade dos materiais utilizados.

## **2.7 Monitorização/Validação**

Utilizando uma abordagem de monitorização, que permita uma regulação dos processos e parâmetros da injeção e condições no local. Monitorizações com precisão têm grande influência no controlo do tratamento do solo com calda. Através de monitorização electrónica e visual dos parâmetros de injeção, permite uma resposta rápida aos problemas ou variações que possam ocorrer nas condições. A monitorização da injeção por permeabilidade é realizada por células de pressão, piezómetros, gráficos de pressão e do caudal da injeção, inspecção visual de empolamentos e assentamentos do solo, o surgimento de calda a superfície e o nivelamento da superfície.

A validação da injeção deve ser realizada através de ensaios, para assegurar o sucesso do tratamento. Os ensaios realizados devem ter em conta todos os parâmetros que estejam definidos no projecto, os resultados obtidos devem ser comparados com as condições iniciais, a informação recolhida pode servir de base para projectos futuros em condições semelhantes. A observação deve ser realizada ao longo do tempo, a ocorrência de uma mau trabalho pode ter como consequência que a calda injectada no solo seja levada pela escorrência da água, deve-se ter sempre em conta o caudal e a pressão da água no solo.



### **3. Estudo de trabalhos realizados em laboratório (Estado da Arte)**

#### **3.1 Introdução**

Para uma melhor compreensão do trabalho a desenvolver em laboratório, teve-se como base a investigação de trabalhos publicados e sua análise, pretendendo compreender que tipos de métodos foram utilizados em laboratório para simulação de injecção quais as características dos materiais utilizados em estudo, que respostas pretendiam obter e quais ficaram por dar.

No estudo dos artigos publicados, verificou-se que foram realizados ensaios de injecção em vários tipos de solos, tais como areia e argila, com diferentes tipos de calda de injecção, sendo que os principais objectivos dos estudos consultados, assim como o desenvolvimento deste trabalho, é a concepção e construção dum modelo físico de injecção, tão próximo da realidade quanto possível, e a realização de experiências, com variação controlada dos parâmetros de injecção para obtenção de resultados e sua discussão.

Dos vários artigos analisados, os que se revelaram de maior importância, que serviu de grande base ao trabalho desenvolvido, foram as referências [2] e [3].

#### **3.2 Objectivos**

Os artigos consultados, têm como objectivo a realização em laboratório de injecção de caldas com diferentes características, em condições controladas, tendo em conta o tipo de solo usado, após o desenvolvimento dum esquema laboratorial que se aproxime o melhor possível a realidade no campo.

Nos vários trabalhos realizados, existem diferentes variáveis que são alteradas, para que a experiência efectuada, e o seu estudo, siga um determinado objectivo pré-definido. Em algumas das experiências, o objectivo é a validação laboratorial de resultados obtidos com modelos matemáticos, que apresentem valores próximos ou com margem de erro aceitável.

Em vários estudos realizados, existem alguns em que o principal objectivo do estudo, era o desenvolvimento de novos tipos caldas, com diferentes componentes químicos e registar o seu comportamento no melhoramento de solos, que resultados se obtinham em relação a sua resistência a compressão, que deslocamentos provocam ao solo, e a sua resistência aos ataques químicos que pudessem surgir.

### **3.3 “Real-scale miscible grout injection experiment and performance of advection-dispersion-filtration model” [4]**

#### **Objectivos e ideias fundamentais**

O objectivo deste estudo é a validação dum modelo geral para descrição dos fenómenos. O modelo, matemático pretende representar um ou mais fenómenos que podem ocorrer na experiência, tais como, a propagação de calda num solo saturado com porosidade média, tendo em atenção os efeitos da estrutura do solo, permeabilidade e o transporte de calda, tentando recriar de uma forma realista a zona de injecção padrão [4].

Os modelos matemáticos têm como base a teoria já existente de fluidos, e sua interacção física e química nas diferentes fases, solos e a sua mistura com calda injectada entre as diferentes fases que compõem o meio poroso, fundamental para descrever o processo de absorção nas superfícies de interface [4]. Também as equações que relacionam a interacção entre a calda e água intersticial, numa relação microscópica, assim como a velocidade real do fluido que percorre o espaço de vazios intersticial são tidas em conta [4]. O modelo desenvolvido por estes autores permite ser utilizado numa gama larga de permeabilidade do solo, conforme a sua compactação, e soluções de suspensão ou caldas de cimento, considerando as como misturas fluidas [4].

O trabalho desenvolvido em laboratório, tem como objectivo o estudo da propagação de caldas de micro-cimento em diferentes pontos de injecção, durante o processo de injecção. Permitiu a verificação experimental da dispersão longitudinal, e a sua comparação com os valores obtidos na modelação matemática. Os resultados obtidos demonstram a quantidade de rácio de absorção de cimento na estrutura do solo. As condições da experiência, que é conduzida num cilindro tridimensional com injecção de calda em condições de simetria axial, e registo continuo de valores dos deslocamentos que ocorrem no solo, e pressão da injecção obtida no interior dos pontos de injecção no seu decurso e a dispersão simétrica radial. O trabalho tem em atenção a dispersão de calda, deposição, o transporte e propagação da calda durante a injecção, assim como a interacção hidro-mecânico devido a injecção num solo saturado e deformável de porosidade média.

#### **Montagem experimental**

Os modelos experimentais utilizam injecção num cilindro tridimensional para o estudo do estado e condições de injecções de calda que simulem operações reais de injecção nos terrenos. A caixa cilíndrica tem como dimensões 1,50 m de diâmetro interno e 1,20 m de altura. A posição do tubo de injecção é colocada para coincidir com o eixo de simetria do modelo para simular uma forma contínua de injecção.

A calda é injectada na massa de solo arenoso através de um tubo, de diâmetro interno de 5 mm, com furos ao longo do tubo com espaçamento de 0,4 m e diâmetro interno de 40 mm, para simular uma linha contínua de fornecimento conforme Figura 3.1.

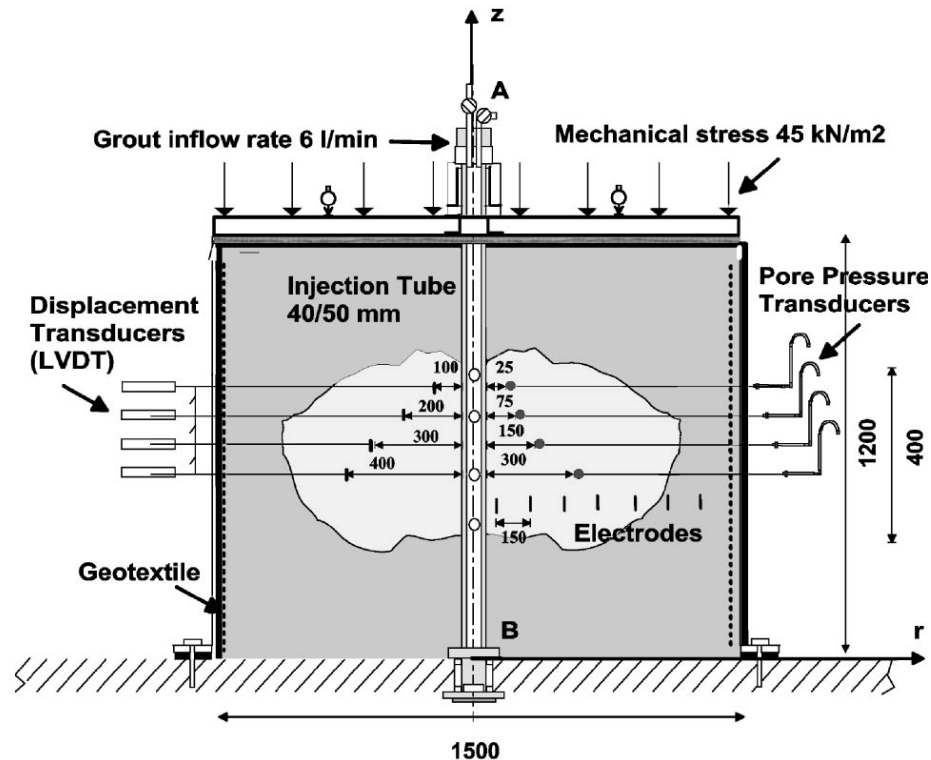


Figura 3.1 - Esquema de injeção, dimensões em mm [4]

A calda injectada é uma suspensão micro-fina de cimento (Spinor A12), cuja curva granulométrica é representada no Figura 3.2, com um rácio de cimento com água de 1/3, é utilizado um aditivo de dispersão e estabilizante (Sika HE50 + stabilizing que representa 3% da massa de cimento), conferindo estabilidade de suspensão e dispersão da calda. São realizados ensaios de fluidez e de estabilidade da calda ao longo da experimentação, mostrando que se mantém estável podendo ser tratada como uma solução homogénea Newtoniana durante a injeção (cone Marsh 28,2 s, e 10% de sedimentação após 3 horas).

O topo e base do cilindro apresentam condições de fronteira diferentes, sendo que a parede lateral apresenta condições equipotenciais de fronteira, pressão hidrostática, com recurso a utilização de um geotextil na lateral. É aplicada uma pressão estabelecida no topo do cilindro de 80 kN para a simulação de pressão exercida pelo solo a um metro de altura. A calda é injectada a uma pressão durante 50 minutos com um caudal  $Q = 61 \text{ min}^{-1}$ , e densidade  $\rho = 10,43 \text{ kN/m}^3$ , ao longo do tubo de injeção entre 0,3 m e 0,7 m [4].

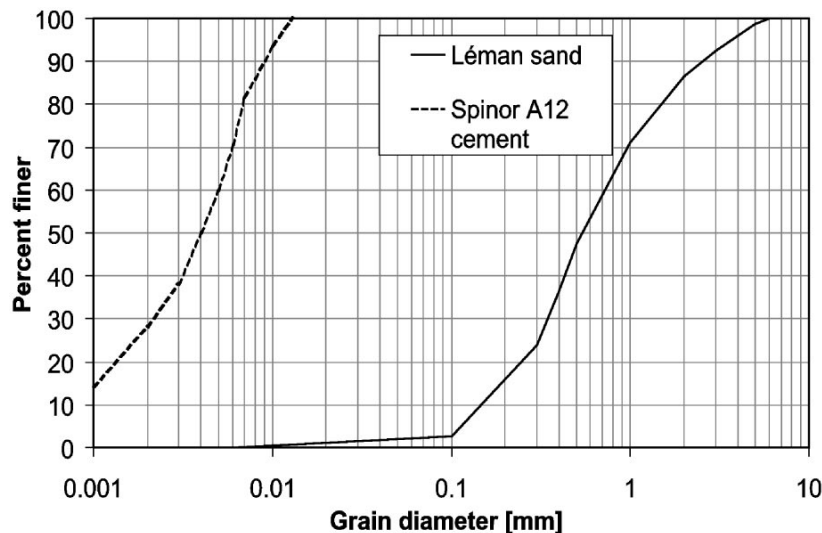


Figura 3.2 – Curvas granulométricas do cimento e do solo [4]

São colocados para registo experimental vários tipos de instrumentos, tais como:

- dois transdutores de pressão, no topo e base do tubo de injeção;
- duas escalas automáticas de aquisição da evolução do caudal da injeção de entrada e saída;
- quatro extensómetros, para medição do deslocamento radial;
- dois transdutores, para medição dos deslocamentos verticais, fixados a base;
- quatro transdutores, para medição de pressão a vários níveis do bolbo no solo;
- dois transdutores de deslocamentos, para medição dos deslocamentos no topo do cilindro, devido ao carregamento mecânico ou levantamento do solo devido a injeção;
- um transdutor de força, fixado no macaco hidráulico, para controlo da força aplicada durante a injeção;
- sete eléctrodos (sistema Werner), para detecção da frente da calda durante a experiência.

### Solo injectado

O preenchimento da caixa é feito com solo arenoso Leman (0/3). O solo é submetido a ensaios para controlo e conhecimento das condições iniciais, como o seu peso volúmico, porosidade e densidade das partículas.

### Injecção de água

Antes da injeção de calda são realizados várias experiências de injeção de água, para análise, da permeabilidade à água e sua computação (condições iniciais necessárias para a injeção experimental de calda), assim como um estudo preliminar das condições do fluxo.

Os resultados do caudal são comparados com a solução analítica existente para as condições de caudal radial. O maior interesse dos ensaios com água, para além da validação do código numérico, tem como objectivo servir de referência para os resultados obtidos da injecção de calda. Assim se a injecção de calda apresentar resultados muito diferentes dos de água, pode-se atribuir a fenómenos adicionais.

### **Conclusão**

O modelo proposto tem como intenção a simulação de injecção por permeação de calda, num solo deformável de porosidade média, tendo em atenção os processos físicos revelantes.

O modelo cilíndrico não é conclusivo em relação aos aspectos hidro-mecânicos durante o período de propagação da calda, mas provando ser crucial para o objectivo de estudo do processo de filtração. É este o equipamento que inspirou o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

A realização de um novo teste com as condições de redução do carregamento mecânico e permitindo o deslocamento lateral, pode ser útil para representação mais realista de uma injecção, apresentando condições próximas da realidade. Não foi possível o desenvolvimento do equipamento que permitisse deslocamentos e obtenção de resultados.

Em relação aos aspectos hidro-mecânicos e processo de consolidação, teria interesse o registo das deformações do solo durante o assentamento e fase de hidratação, assim como a tensão induzida mecanicamente tem importância suficiente ao induzir deformações não desprezáveis devido ao volume injectado. No decorrer do processo de injecção realizaram-se leituras de assentamentos na aplicação de carga e durante a injecção através da leitura do deflectómetro [4].

## **3.4 “A new laboratory apparatus for grout injection studies” [2]**

### **Objectivos e ideias fundamentais**

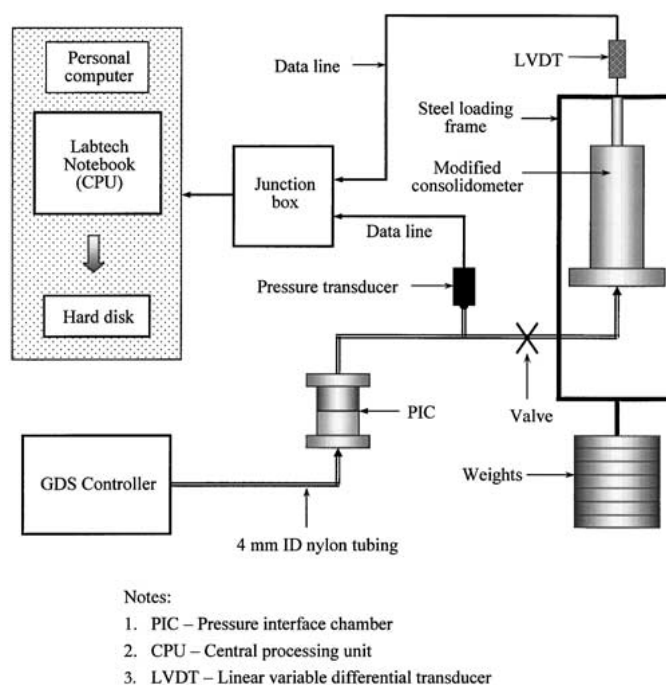
Objectivo e a criação de um modelo experimental, que permitisse ser normalizado, para vários métodos de injecção com diferentes valores para os parâmetros de controlo que de acordo com o estudo que se pretenda, tais como pressão de injecção da calda, volume de calda injectada, razão da calda injectada, espaçamento de pontos de injecção, a sequência de injecção e tipos de solo que possam ser utilizados na realização de injecções. Com esse objectivo foi idealizado e montado um novo equipamento experimental, que pudesse corresponder ao pretendido, dentro dos vários tipos de injecção os que são mais estudados

em laboratório, injeção de compactação e injeção de fracturação, com maior ênfase em solos argilosos.

Os tipos de injeção são simulados de duas maneiras bem, distintas: na injeção de compactação é realizada através da expansão de um balão de látex na cavidade, na injeção fractura é feita com a utilização de resina epoxy ou calda de cimento com bentonite, directamente no solo. Os dados retirados da experiência, são referentes aos diversos factores que podem ser alterados em função do tempo decorrido, podendo ser utilizado um ponto de injeção assim como múltiplos pontos de injeção no solo. A construção do modelo experimental, tem como objectivo fornecer uma plataforma padronizada para futuros estudos na mesma área, e desenvolvimento da tecnologia existente.

### Montagem experimental

O modelo experimental tem como base um consolidómetro alterado com diferentes diâmetros, que é utilizado para a consolidação de argilas através de uma carga pré-determinada, com um ou quatro pontos de injeção que são instalados na base. O tubo de injeção é conectado a uma câmara que contém calda do aparelho de interface de pressão conforme na Figura 3.3.



**Figura 3.3 – Esquema da experimental de injeção de calda [2].**

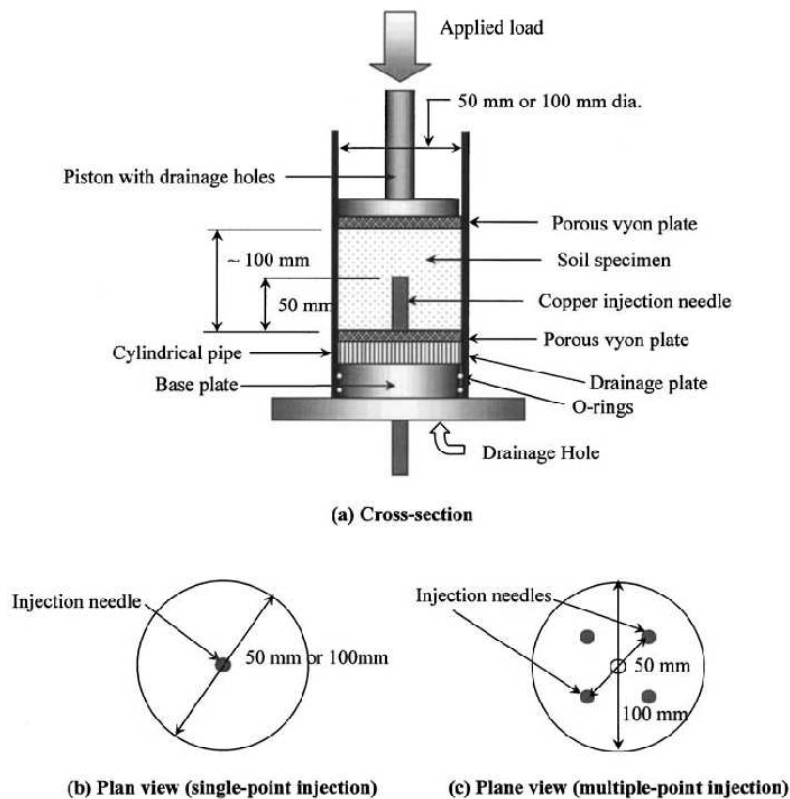
A câmara de calda é separada da câmara de pressão hidráulica da água por uma membrana no interior do interface de pressão, a câmara de água está ligada a um controlador de pressão e volume. O interface de pressão é utilizado para transmitir a pressão hidráulica do controlador de pressão e volume para a calda durante a injeção. São



colocados transdutores de pressão entre o interface de pressão e o ponto de injeção para a pressão da calda injectada, assim como transdutores de deslocamento (vertical), a pressão de injeção e volume são controlados pelo controlador de pressão e volume. É possível a utilização deste esquema de experimentação para diferentes tipos de caldas e diferentes tipos de técnicas de injeção.

A utilização de consolidómetros alterados permite a preparação de solos com diferentes diâmetros e condições iniciais tais como o rácio de vazios existentes, pressão de pré-consolidação e sobre-consolidação. Foram introduzidas uma placa de drenagem porosa de vyon no topo e na base que é utilizada para facilitar a drenagem vertical numa dimensão do solo na preparação, durante e depois do processo de injeção. A utilização de um pistão para aplicação duma carga predefinida na preparação assim como no decorrer da injeção, podendo-se assim controlar o grau de sobre-consolidação. O consolidómetro alterado permite também a aplicação de tubos e anilhas de injeção.

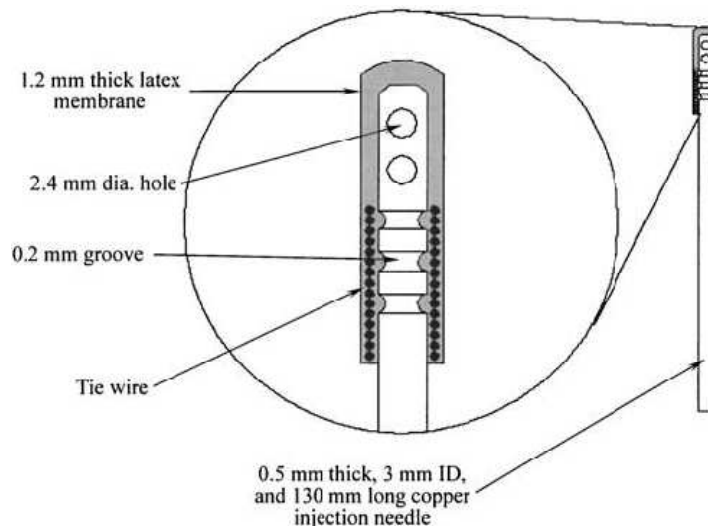
O consolidómetro modificado, é composto por um tubo conectado na sua base, tendo duas composições diferentes, sendo essas de 50 mm de diâmetro e 5mm de espessura de latão, e o outro de 100 mm de diâmetro e 7 mm de espessura de alumínio. O tubo é conectado a uma base do mesmo material que foi fabricado, com orings entre estes para prevenir fugas. A altura do consolidómetro é de 280 mm, desenhado para albergar um solo de 100 mm aproximadamente de altura. Na base do consolidómetro de 50 mm de diâmetro é realizado um furo para colocação do tubo de injeção simples como na Figura 3.4. São realizados cinco furos semelhantes na base do consolidómetro de 100 mm de forma a simular múltiplas injeções, uma no centro e quatro com igual espaçamento do centro da circunferência como na Figura 3.4. Assim pode-se usar o consolidómetro de 100 mm para injeções simples apenas com o ponto de aplicação central ou para múltiplas injeções utilizando os outros quatro furos, podendo realizar-se múltiplos pontos de injeção simultaneamente ou sequencial, os furos não utilizados são obturados.



Note: Not to Scale

**Figura 3.4 – Detalhes do consolidómetro alterado [2]**

Os tubos de injeção são fabricados com 0,5 mm de espessura, 3 mm de diâmetro e 130 mm de comprimento, o topo é colocado a 50 mm da base da placa de vyon. Para prevenir fuga de calda do consolidómetro durante a injeção é colocado um anel de aço com 0,3 mm de diâmetro com uma camada de látex no furo de injeção temporariamente. O látex permite através da fricção existente sustentar o anel e bloquear fugas, que possam existir no pequeno espaço entre o furo e o tubo de injeção. Secção de 40 mm do tubo é composta fora do consolidómetro permitindo a ligação à base durante a instalação, é envolvido por fita de Teflon® para prevenir derrame de calda na parede lateral ao longo do tubo de injeção.



**Figura 3.5 – Detalhes do balão de látex [2]**

A expansão de cavidade com recurso a um balão é realizada através, da colocação de um balão de látex na ponta do tubo de injeção, para simular injeção de compactação sem introdução de calda no solo durante o processo. No tubo de injeção são realizados dois furos de 2,4 mm perto da ponta para permitir a saída da calda na horizontal e expandir o balão como ilustrado na Figura 3.5. São introduzidas três ranhuras de 0,2 mm a uma distância de 15 mm da ponta do tubo de injeção, permitindo que o látex preencha a superfície da ponta, é obturado o furo no tubo de injeção com um anel de 2,8 mm para impedir que o látex preencha o furo. Para preenchimento das ranhuras por completo a ponta do tubo é mergulhada numa solução de látex, a cura é feita em contacto com o ar durante duas horas. O processo é repetido cinco a oito vezes, até perfazer uma espessura aproximada de 1,0 mm. A zona das ranhuras é envolvida por um fio metálico de 0,32 mm de diâmetro e força de rotura de 5,7 N, o conjunto é mergulhado na solução de látex para a selagem. Após a última camada é retirado o anel que se encontrava a obturar o tubo. A parte exterior da membrana é lubrificada, para minimizar algum dano potencial que possa ocorrer pela interacção entre o solo e a membrana de látex durante a injeção. Durante o processo de montagem é necessário assegurar que não existe nenhuma bolha de ar no interior da membrana de látex, porque pode provocar um ponto fraco no balão, resultante numa ruptura prematura da membrana durante a injeção. O tubo de injeção é preenchido com a calda de injeção e fechado com uma válvula existente no fundo do tubo para que não exista bolhas de ar dentro do sistema.

A pressão introduzida no sistema de injeção de calda, é realizado com a utilização de uma câmara de interface de pressão, que transmite a pressão hidráulica do controlador pressão/volume para a calda. A câmara é composto por duas câmaras separadas por uma membrana de borracha flexível, a câmara superior é onde está colocada a calda de injeção, a câmara inferior contem água dearificada. A câmara superior é conectada ao tubo

de injeção do consolidómetro, e a câmara inferior é ligada ao controlador de pressão/volume. O volume de calda a ser injectada, é controlado pelo volume de água dearificada que é introduzida na câmara inferior pelo controlador de pressão/volume, sendo necessário assegurar que não existe bolhas de ar pressas no interior das câmaras [2].

É utilizado um controlador GDS de pressão/volume para a injeção na experimentação. Trata-se de um microprocessador que controla a actuação hidráulica para regulamentação precisa e medição da pressão do líquido e volume de injeção sendo o líquido hidráulico utilizado a água dearificada. O aparelho é programado para rampear e para um ciclo de pressão e volume mudando linearmente em função do tempo. A máxima pressão de injeção e volume deslocado controlado pelo aparelho é de 2 MPa e 200 000 mm<sup>3</sup> com precisão de pressão de 1 kPa e de volume de 1 mm<sup>3</sup>. O cilindro do controlador tem de ser preenchido com água dearificada antes da experimentação, para assegurar que tem o suficiente para a realização da injeção, estando inclinado aproximadamente 5° com a horizontal para expulsar ar que possa existir no sistema. Os valores são primeiro definidos pelo experimentador, sendo a pressão de injeção depois ajustado e registado automaticamente pelo controlador.

A instrumentação utilizada na experimentação é um transdutor diferencial variável linear, transdutor de pressão e operação de registo de dados. O transdutor diferencial variável linear é utilizado para medição dos deslocamentos verticais do solo, manufacturado por Sangamo Schlumberger com o máximo deslocamento de 50 mm e sensibilidade de  $\pm 0,002$  mm, é colocado no cimo da barra central da carga aplicada como na Figura 3.3. O transdutor de pressão para obtenção da pressão de injeção da calda no tubo de 4 mm de nylon entre o ponto de injeção e a câmara de interface de pressão como na Figura 3.3. E operação de registo de dados que são obtidos dos transdutores, sendo o circuito constituído por uma ligação a um amplificador de sinal, que depois é ligado a computador com software Labtech Notebook, a frequência utilizada é de 10 Hz durante a injeção e 1/60 Hz no restante período como na Figura 3.3.

### **Solo utilizado**

O solo utilizado para a experimentação é um caolino de classificação E, a descrição completa do material é referida na literatura [11]. A argila de lodo é preparada através da mistura manual, com uma vareta, de caolino de classificação E em pó e seco com água dearificada durante 5 minutos. A razão de pó de caolino com água dearificada é de 1,2:1 de massa. A quantidade da mistura preparada é adequada para o volume do molde previsto de utilizar. A pré-mistura é colocada numa misturadora mecânica em vácuo no mínimo em 2 horas, para remoção do ar existente.

## **Injecção de calda**

A calda utilizada é uma resina epóxi produzida pela Sempol Surfaces Ltd. A resina epóxi é preparada através da mistura de componentes químicos derivados de bisfenol com epiclorhidrino e um endurecedor composto por amina. A razão utilizada é de 10:6 de resina para endurecer por peso, obtendo a máxima resistência da resina epóxi. Os químicos são misturados e agitados durante um minuto utilizando uma vara de vidro, antes da colocação na câmara do PIC.

A resina epóxi não apresenta exsudação e consegue penetrar nos poros da argila antes de endurecer. Uma grande quantidade de calor é libertada devido a reacção química, e a viscosidade do material aumenta rapidamente antes de endurecer. O tempo entre a reacção e o endurecimento geralmente é de aproximadamente 30 minutos, resultando num material duro com elevada tensão resistente e forças de corte.

## **Experimentação**

Foram realizados três tipos diferentes de experiências com injecção de compactação, injecção de compactação e injecção de fracturação.

A injecção de compactação é realizada através do estudo da pressão exercida no solo em função do volume de calda injectada. Sendo utilizado água como o fluido hidráulico, não sendo necessário o uso do PIC, estando os controladores pressão/volume ligados directamente à base dos injectores. O caudal de injecção utilizado é de  $500 \text{ mm}^3/\text{s}$  e um volume total de  $5000 \text{ mm}^3$ .

A injecção de compactação tem como objectivo de estudo a forma final da calda. A resina epóxi é injectada no balão de látex para capturar a forma da calda no interior do solo, para estudos posteriores. O procedimento de injecção é semelhante ao de injecção de compactação, mas neste caso é utilizado o PIC.

A injecção de fracturação é realizada para o estudo do padrão da fractura na injecção. Como se pretende uma injecção de fracturação, não é utilizada a membrana de látex. A resina epóxi é injectada na argila para fracturação do solo.

## **Conclusão**

O trabalho apresenta um grande desenvolvimento em esquematizar a experimentação para diferentes tipos de injecção de calda, criando novos equipamentos e adaptando outros conforme as condições, os quais permitem injecção de fracturação e injecção de compactação através da membrana de látex. Recorre-se a controladores de pressão e volume para um registo mais preciso de pressões e volumes utilizados na experimentação.

Com base na informação recolhida no estudo analisado, a nível do equipamento utilizado e esquema de montagem, escolheu-se o sistema de experimental como base no desenvolvido em laboratório para o trabalho apresentado nesta dissertação.

### **3.4.1 “Pressure-controlled cavity expansion in clay” [3]**

#### **Objectivos e ideias fundamentais**

No seguimento do trabalho desenvolvido no artigo “A New Laboratory Apparatus for Grout Injection Studies” [2], realizaram-se ensaios de Injecção de compactação, através da utilização de balão de látex, para a expansão da cavidade com o objectivo de resolução dos problemas geotécnicos, verificando-se que o sucesso da aplicação desse método é variável.

As soluções que podem ser utilizadas, nas condições de fronteira, para o problema de expansão da cavidade podem ser classificadas em duas categorias: expansão da cavidade com controlo da pressão, ou expansão da cavidade com controlo dos deslocamentos. Os resultados obtidos são diferentes conforme o método utilizado para a expansão da cavidade: (i) com controlo da pressão, a pressão de expansão é uniforme e em função do tempo decorrido, independente da forma que a cavidade obtém; (ii) com controlo dos deslocamentos, a geometria da cavidade é esférica ou cilíndrica.

As soluções analíticas são obtidas para o caso de expansão da cavidade, em condições homogéneas e infinitas com formas esféricas e cilíndricas, através do controlo de deslocamentos num estado de tensão isotrópico.

Neste artigo os autores procuram responder aos problemas relacionados com a injecção de compactação e a diminuição da resistência das ancoragens, que são caracterizadas pela expansão da cavidade com controlo de pressão. O objectivo do desenvolvimento do processo laboratorial é aprofundar o conhecimento, da expansão de cavidade com pressão controlada em solos argilosos, para aplicações em injecções de compactação.

### **3.5 “Mathematical model for bore-injected cement grout installations” [5]**

#### **Objectivos e ideias fundamentais**

O desenvolvimento de um modelo matemático, para aumento de conhecimento do processo físico que ocorre na construção de estacas cravadas e ancoragens e a realização experimental do modelo desenvolvido, permitindo um grau de confiança dos valores obtidos e credibilidade na sua aplicação.

Consoante a pressão de injecção a variação de volume da calda de cimento apresenta diferentes características. Para uma pressão de 2 MPa, a alteração de volume da calda de

cimento é relativamente grande, devido a permeabilidade da calda e a expulsão de água contida no solo, ao passo que pressões mais elevadas (até 20 MPa ou superior), a variação de volume é bastante inferior, deve-se em grande medida a reorientação das partículas de cimento, a perda parcial de água e sua pressão intersticial entre camadas da microestrutura.

### Montagem experimental

Em estudos realizados, para a validação do modelo matemático existe a necessidade de obtenção valores experimentais que possam ser tratados e comparados com os obtidos por via analítica. Uma pasta de areia argilosa é compactada em camadas de 30-40 mm num espaço anular com diâmetro interno “d”, e diâmetro externo de 680 mm, e altura de 150 mm. É colocado uma célula pneumática para aplicação de uma pequena carga vertical de  $0,10 \pm 0,05$  MPa. O índice de vazios em vários ensaios tinha valores de 0,68 a 0,98 e o coeficiente de permeabilidade em todos os casos de  $2,4 \times 10^{-4}$  cm/s. Após a compactação de um cilindro de aço (com um diâmetro igual ao do furo de injeção simulado) no centro do solo e sua extracção, é inserido o injectador no vazio resultante Figura 3.6.

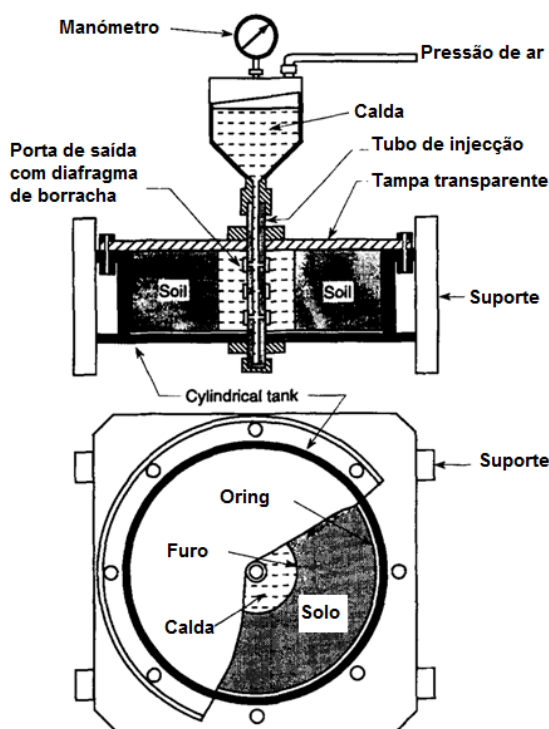


Figura 3.6 – Esquema de injeção [5]

É colocado uma película transparente na superfície do solo e uma tampa fixada ao topo do dispositivo de teste. O injectador é conectado através de uma abertura no topo a um reservatório de calda cimentícia (mistura de cimento portland e água), que é injectada sobre uma pressão de 0,7 – 0,8 MPa, registado por um manómetro, como demonstra na Figura 3.6.

O programa de teste é montado com o objectivo de investigação de várias características, tais como:

- O efeito da pressão de injecção e duração na alteração do diâmetro da furação, a densificação do solo junto ao furo existente e a consolidação da calda no furo;
- A influência da razão água e cimento da calda nas deformações do solo;
- A influência do diâmetro do furo na consolidação da calda [5].

### **Injecção de calda**

A injecção de calda utilizada é composta por água e cimento portland com um rácio de água cimento de 0,5, para diferentes indices de vazios em estudo (entre 0,87 e 0,97). A pressão utilizada no estudo da densificação do solo é de 0,1 MPa ou 0,3 MPa [5].

### **Conclusão**

O estudo realizado permite concluir que com o aumento do tamanho do furo de injecção e diminuição da razão de água/cimento diminui, também decresce a possibilidade de ocorrer fracturação hidráulica no solo. Para furações em solos arenosos o tempo para a completa consolidação solo é ditado pelas propriedades da calda, o inverso ocorre para as argilas.

O estudo permite concluir que é possível construir modelos matemáticos que representam as condições de injecção do modelo físico, sendo um dos pontos a ter em consideração em estudos futuros que possam ser realizados.

## **3.6 “Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts” [6]**

### **Objectivos e ideias fundamentais**

O estudo apresenta os diferentes tipos de compostos químicos que podem ser usados nas caldas, independente do objectivo da injecção e do tipo de solo. As caldas variam desde a solução comum de argamassa a caldas espessas ou líquidas de cimento, com aditivos na água tais como superplastificantes, aceleradores de presa, anti-congelantes, entrada de ar, e caldas com base em resinas ou betuminosas, e protecção contra as condições ambientais.

Nas últimas décadas, têm sido largamente utilizadas caldas compostas por polímeros, assim como aditivos no cimento, devido a sua influência nas propriedades, tais como as reológicas, a capacidade resistente, a durabilidade, a permeabilidade, e a resistência a erosão química dos solos. A realização de experiências laboratoriais, têm como objectivo a observação do comportamento dos diferentes tipos de caldas, com principal ênfase, em caldas com resina e acrílico, emulsões de polímeros em solos arenosos.



## Montagem experimental

A montagem experimental utilizada para a realização das injecções é construída de acordo com ASTM D4320-93, como demonstrado na Figura 3.7, compostas pelas seguintes partes:

- tanque com uma misturadora de elevada rotação;
- bomba de duplo diafragma a ar comprimido;
- compressor;
- a coluna de injecção, duas peças metálicas em tubo com 10,5 cm de diâmetro exterior e altura de 10,5 cm, para facilitar a extracção;
- um recipiente para recolher o excesso de calda que saia do tubo;
- controlador de pressão de injecção;
- controlador de caudal de injecção.

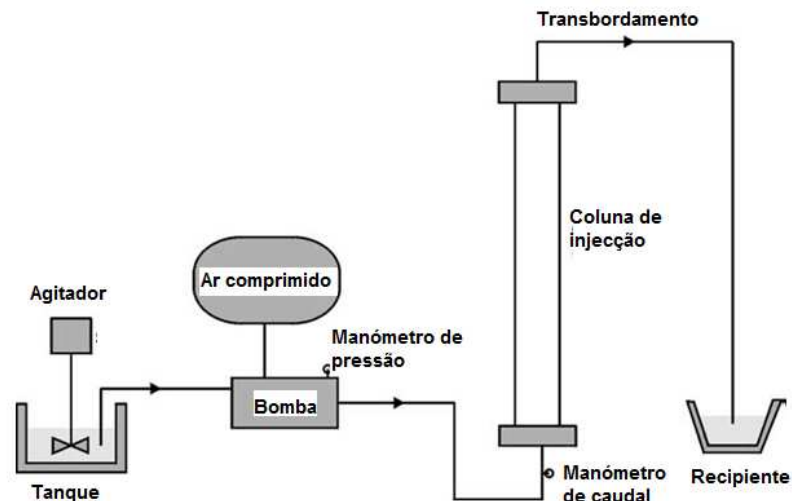


Figura 3.7 – Esquema de injecção [6].

## Solo utilizado

O solo utilizado é uma mistura de areia grossa com calcário e sílica, com uma distribuição de partículas que varia entre 2 a 12,7 mm e coeficiente de uniformidade igual a 1,6. O solo têm peso volúmico seco de igual a  $14,85 \text{ kN/m}^3$  e peso volúmico saturado de igual a  $19,35 \text{ kN/m}^3$  e porosidade de 45%. A permeabilidade do solo com uma densidade relativa de  $D_r = 0,95$  é de  $1,52 \text{ cm/s}$ .

## Injecção de calda

Na injecção de calda são utilizados vários materiais, tais como,

- cimento com massa volúmica de  $3,15 \text{ g/cm}^3$  e tensão de compressão aos 28 dias de 45 MPa;

- argila recolhida de escavações a uma profundidade de 10 a 15 m na área de Salónica;
- resina acrílica, é constituída por uma emulsão de um químico sintético elástico, permitindo um aumento significativo das ligações da calda, coesão e resistência;
- emulsão de metil metacrilato, é constituída por polímero com butil acrilato e ácido acrílico, com 30% da massa de água deionizada, tendo uma tensão característica de 4 MPa.

A mistura de calda é preparada com proporções ponderais de água, cimento e argila com um rácio de água/cimento de 2 e 1, a adição de resina acrílica ou emulsão de metil metacrilato de 30% do peso total do material sólido. A mistura é feita num reservatório de 10 litros durante 5 minutos.

A injeção é realizada a baixa pressão perto dos 100 kPa, tendo em conta que todas as misturas de calda apresentam boa fluidez a penetração nos poros da areia. O caudal inicial da injeção é de 0,1 l/s, terminado quando o volume de calda que atravessa a amostra excede em 120 % o volume de poros do solo.

## **Conclusão**

O estudo permite retirar informações relativas a diferentes tipos de calda com diferentes constituintes, que podem ser utilizados para injeção de calda em solos. Os vários ensaios realizados facultam diversa informação das propriedades mecânicas com diferentes períodos de cura, podendo ser de 7 dias, 28 dias ou 90 dias do solo injectado por diferentes tipos de calda.

Através deste estudo é possível idealizar ensaios que se possam realizar com o mesmo equipamento para diferentes caldas. E desta forma proceder ao seu estudo nas diferentes características que podem apresentar solos arenosos com diferentes componentes na calda de injeção.

## **3.7 “Fracturing Pressure of soil ground by viscous materials” [7]**

### **Objectivos e ideias fundamentais**

A investigação é feita para estudar o fenómeno de fracturação hidráulica em solos por líquidos de baixa viscosidade, tais como água ou caldas. Devido a fracturação do solo não provocar apenas perda de material de injeção mas também estragos tais como levantamento do solo. E clarificação do efeito do tipo de solo, permeabilidade, rigidez e pressão de confinamento pode ter na pressão de fracturação.

O material de injecção para a fissuração do solo, não apresenta necessariamente baixa viscosidade como água ou caldas químicas. No caso do preenchimento de vazios para prevenção de assentamentos na construção de túneis, e injecção em ancoragens, é utilizada argamassa ou calda com viscosidade elevada, podendo provocar fissuras por excesso de pressão de injecção.

### Montagem experimental

A montagem experimental para o teste de injecção de fracturação em solos coesivos é demonstrada na Figura 3.8. Em todos os casos a forma do provete é a de um cilindro oco, com diâmetro exterior e altura de 180 mm, e o diâmetro do furo no interior de 13 mm.

Após o furo ser preenchido com material é colocado uma fita plástica no topo e no fundo do furo para prevenir fugas do material de injecção. Uma camada de gordura impermeável é formada em ambos os lados do provete. Para prevenir que o furo no provete se desmonte devido ao confinamento, a pressão de confinamento é aplicada simultaneamente à pressão no furo. No decorrer da experiência a pressão de confinamento mantém-se constante ao passo que a pressão no furo aumenta gradualmente.

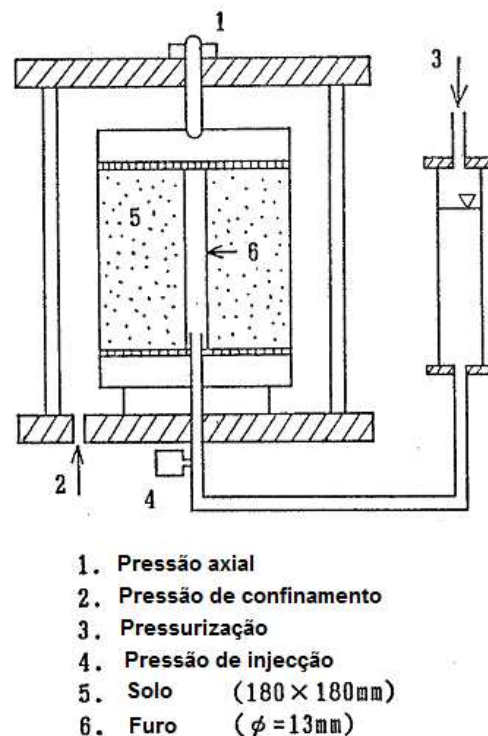


Figura 3.8 – Esquema de injecção de solos coesivos [7]

A pressão de fracturação do solo é decidida de acordo com a alteração da pressão no furo durante a injecção. O abaixamento repentino da pressão no furo que é registada no manómetro é sinónimo de fracturação.

A montagem experimental para o teste de injeção de fracturação em solos arenosos é demonstrada na Figura 3.9. O solo arenoso seco é colocada no molde, em que o tubo de injeção é colocado na base na vertical, sendo compactado para obter a densidade desejada. O diâmetro do molde é de 180 mm. O tubo de injeção é formado por vários furos pequenos, e colocado uma malha metálica a envolver o tubo para prevenir a entrada de areia.

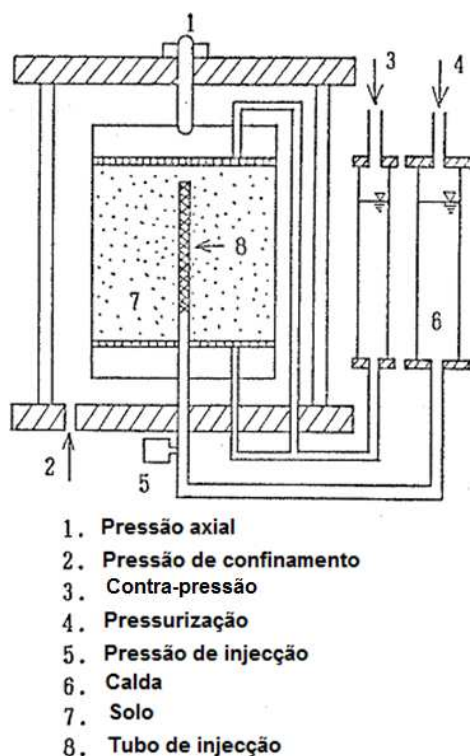


Figura 3.9 – Esquema de injeção em solos arenosos [7]

### Solo utilizado

As características dos vários tipos de solo coesivos preparados estão demonstradas na Tabela 3.1. As amostras de solo são artificialmente preparadas, compostas por argila de Kibushi, gesso, bentonite, tetraborato de sódio (bórax) e água. O tetraborato de sódio é utilizado para retardar o endurecimento do gesso. Os constituintes são misturados nas proporções desejadas descritas na Tabela 3.1, e colocado no molde de diâmetro de 180 mm. Na base do molde é colocado um tubo na vertical de diâmetro de 13 mm. O molde é tapado com uma folha de vinil, para prevenir a dessecação e deixado em repouso durante 20 horas.

**Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos solos coesivos [7]**

Amostra	Mistura (g)	$q_u$ (kPa)	$\sigma_t$ (kPa)	$E_{50}$ (kPa)
C1	Argila Kibushi 3850, gesso 1550, bentonite 500, água 2900	0,08 – 0,12	0,020 - 0,025	8 – 12
C2	Argila Kibushi 4100, gesso 1350, bentonite 500, água 2900	0,04 - 0,08	0,012 - 0,015	3,5 - 6
C3	Argila Kibushi 4300, gesso 1200, bentonite 500, água 2900	0,0 - 0,04	-	2,4 – 3,5

Legenda:  $q_u$  - Resistência à compressão simples;  $\sigma_t$  - Resistência a tracção;  $E_{50}$  - Modulo de Young

O tipo de solo arenoso utilizado é Keisa-5, Keisa-7 e uma mistura composta por Keisa-7 e Argila de Kibushi, e as suas características descritas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas dos solos arenosos [7]**

Amostra	Tipo de areia	$r_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	K (cm/s)	$\phi'$ (°)	E (kPa)
S1	Keisa – 5	1,50	$6,2 \times 10^{-2}$	38	25
S2	Keisa – 7	1,40	$6,3 \times 10^{-3}$	30	25
S3	Areia misturada	1,52	$8,2 \times 10^{-4}$	30	15

Legenda:  $r_d$  - Densidade; K - Coeficiente de permeabilidade;  $\phi'$  - Ângulo de atrito; E - Modulo de Young

### Injecção de calda

A pressurização do furo é realizada com uma bomba manual na maioria dos casos. No entanto para os testes de fracturação com injecção constante recorre-se a uma bomba eléctrica, sendo realizados para clarificar o efeito do método de pressurização na pressão de fracturação. O provete é submetido a uma pressão de confinamento de 98,1 kPa. A taxa de pressurização da bomba manual é de 1,96 kPa/s. A injecção constante através da bomba eléctrica tem uma taxa de 3,0 L/min.

A injecção em solo arenoso é preparada da seguinte forma, através da aplicação de pressão negativa ao provete utilizando uma bomba de vácuo, de seguida aplica-se a pressão de confinamento ao provete de 49,1 kPa e saturado com água. A pressurização do furo é realizada com a bomba manual com uma pressão de 1,96 kPa/s, e a injecção é realizada com uma taxa de 3,0 L/min.

O material utilizado nas várias injecções é descrito na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Caldas injectadas [7]**

<b>Tempo do fluxo F (s)</b>	<b>Mistura</b>
8 – 10	Água
15 – 20	10% bentonite suspensão 2500 (cc) Cimento 250 (g), adjuvante retardante 200 (cc)
25 – 30	10% bentonite suspensão 2500 (cc) Cimento 700 (g), adjuvante retardante 200 (cc)
60	10% bentonite suspensão 2500 (cc) Cimento 1100 (g), adjuvante retardante 200 (cc)

Legenda: Tempo do fluxo é determinado pelo ensaio P-funnel

## Conclusão

O estudo permitiu realizar ensaios de fracturação hidráulica, concluindo que a pressão de fracturação aumenta conforme o aumento do caudal do material de injecção. A pressão de fracturação mantém-se constante após 30 s de injecção. A um valor constante de injecção quase iguala a pressão de expansão da cavidade que provoca a rotura da furação.

A recolha de informação com base neste estudo permite idealizar estudos futuros para diferentes tipos de injecção utilizando o mesmo equipamento utilizado nesta dissertação.

## 3.8 “Engineering properties of grouted sands” [8]

### Objectivos e ideias fundamentais

O estudo realizado tem como objectivo a análise comparativa do comportamento de solos injectados com calda com o comportamento na ausência da injecção, utilizando-se quatro tipos diferentes de solo. Os provetes de solo injectados são preparados em laboratório através da injecção de cimento muito fino ou caldas minerais. São realizados vários ensaios tais como a compressão uni-axial sem confinamento, e ensaios de tracção, para registar o efeito dos diferentes factores como a razão de cimento e água da calda, densidade relativa do solo e a distribuição granulométrica podem ter na rigidez dos solos injectados. O ensaio triaxial é realizado para demonstrar que um solo injectado por calda de cimento muito fino ou calda mineral, apresenta melhoramento da resistência e rigidez do solo.

### Montagem experimental

O procedimento experimental estabelecido e utilizado para a realização dos ensaios, é a colocação de areia com uma altura de queda de zero, numa coluna cilíndrica transparente de PVC. O diâmetro da coluna cilíndrica é de 80 ou 100 mm com uma altura de 900 mm. O tubo interno para a colocação da areia é puxado para fora no decorrer do preenchimento do

tubo de PVC, simultaneamente o tubo é percutido com um martelo para compactação do solo, como demonstrado na Figura 3.10. Supostamente, o método permite uma homogeneidade do solo satisfatória.

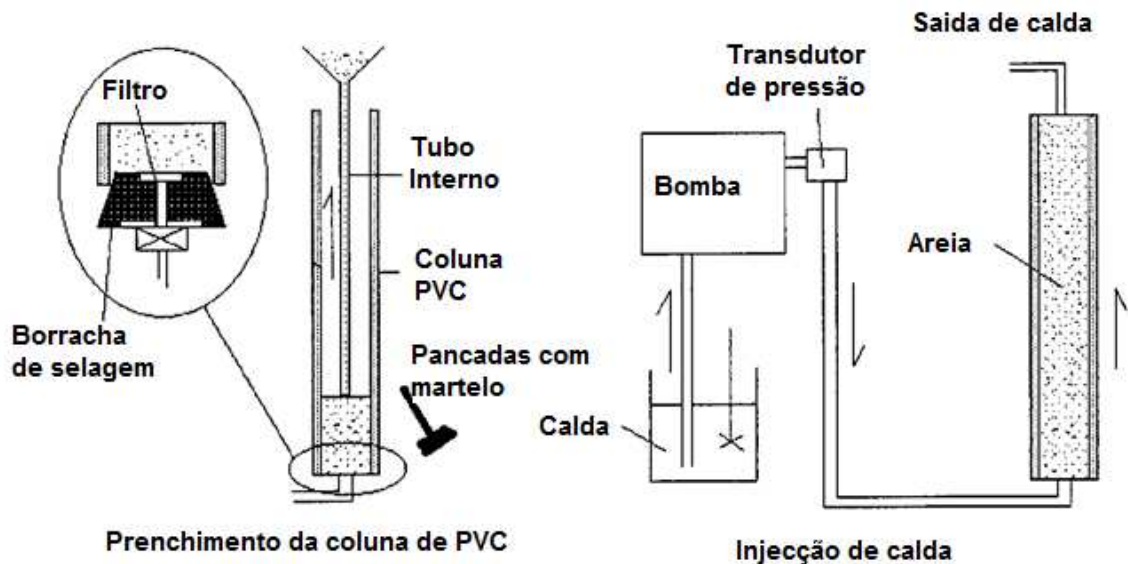


Figura 3.10 – Preparação de areias injectadas [8]

Após a finalização do preenchimento do tubo de PVC, algumas colunas são saturadas com água e outras são mantidas secas. O volume de calda a ser injectada é estabelecido 1,2 vezes mais que o volume inicial de vazios da estrutura granular. A injeção ocorre da base para o topo da coluna com um caudal volumétrico constante de  $3 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Gradualmente são preenchidos os vazios pela permeação da calda sem aumento da pressão significativo.

As colunas obtidas pela injeção por permeação são preservadas numa sala com controlo da humidade e temperatura durante um período de 28 dias. Após o período de cura as propriedades dos provetes mantêm-se constantes. As faces das amostras com razão da altura/diâmetro de dois, são preparadas para os ensaios.

### Solo utilizado

O estudo realizado utiliza quatro solos distintos a areia Fontainebleau NE34 (FS), três depósitos de aluvião do rio do Sena (areia do rio Sena (SRS), depósito aluvião médio (ADM), depósito aluvião grosso (ADC)). As características dos solos testados estão indicadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características das areias [8]

Características /Areia	$U_c = d_{60}/d_{10}$	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\gamma_{\min}$ ( $\text{kN/m}^3$ ) ASTM D4254-91	$\gamma_{\max}$ ( $\text{kN/m}^3$ ) ASTM D4253-93
Areia Fontainebleau	1,4	200	13,7	17,2
Areia do rio Sena (SRS)	3,5	530	14,4	18,2
Deposito aluvião médio (ADM)	2,1	410	14,9	17,9
Deposito aluvião grosso (ADC)	5,9	1300	16,4	19,4
Areia Dunquerque	3,1	240	-	-

Legenda:  $U_c$  – Coeficiente de uniformidade;  $d_{60}$  – Tamanho médio das partículas de 60% da massa;  $d_{10}$  – Tamanho médio das partículas de 10% da massa;  $d_{50}$  – Tamanho médio das partículas;  $\gamma_{\min}$  – Peso volúmico seco mínimo;  $\gamma_{\max}$  – Peso volúmico seco máximo

A areia Fontainebleau (FS) é uma areia siliciosa fina, uniforme e standardizada, ao passo que a areia do rio Sena (SRS) e os depósitos de aluviões (ADM, ADC) são areia de cascalhento de sílica calcário. A curva de distribuição granulométrica dos solos utilizados está representada na Figura 3.11. A fracção de dimensões entre 2,5 mm e 10 mm da areia do rio Sena (SRS) e dos depósitos de aluviões (ADM, ADC) é reduzida.

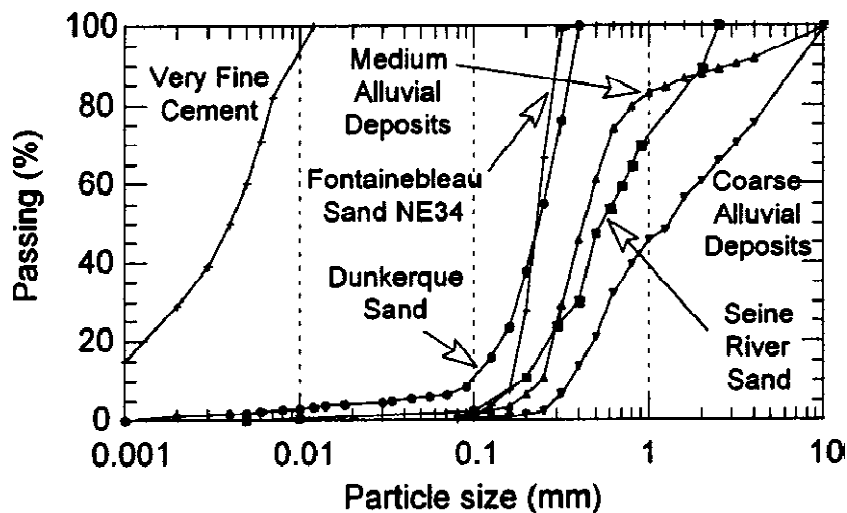


Figura 3.11 - Curva granulométrica das areias ensaiadas [8]

### Injecção de calda

No estudo de injecção de calda foram utilizados 12 tipos de calda diferentes, distinguidos pela razão de cimento/água, pela razão de massa seca/água, pelo tipo de material na sua composição e tamanho das partículas. Foram utilizados três caldas compostas por cimento muito fino (CG), três caldas de solução mineral (MG) [13], e seis misturas de cimento muito fino (IJ), como resumido na Tabela 3.5. O tamanho das partículas do cimento utilizado é



inferior a 12  $\mu\text{m}$  como demonstrado na Figura 3.11. As caldas apresentam propriedades reológicas, que incluem baixa viscosidade plástica, baixa tensão de resistência. Os parâmetros da calda são mantidos constantes durante a injeção através do uso agentes dispersores, adjuvantes super-plastificantes e misturadores de elevada velocidade. A estabilidade da calda permite uma efectiva permeação através da areia.

**Tabela 3.5 – Caldas e solos arenosos injectados e respectivas resistências compressão [8]**

<b>Calda</b>	<b>Razão de material seco/água</b>	<b>Razão cimento/água</b>	<b><math>R_{c, PG}</math> (MPa)</b>	<b><math>R_c</math> (MPa)</b>
Calda cimentícia (CG1)	0,2	0,07	-	0,9
Calda cimentícia (CG2)	0,2	0,11	-	1,1
Calda cimentícia (CG3)	0,2	0,15	-	1,9
Calda Mineral (MG1)	0,3	0,056	-	0,6
Calda Mineral (MG2)	0,3	0,078	-	0,9
Calda Mineral (MG3)	0,26	0,123	-	1,9
Calda cimentícia IJ1	-	0,17	0,8	1,1
Calda cimentícia IJ2	-	0,23	1,9	2,5
Calda cimentícia IJ3	-	0,29	-	3,2
Calda cimentícia IJ4	-	0,34	4,2	5,1
Calda cimentícia IJ5	-	0,40	5,6	6,4
Calda cimentícia IJ6	-	0,46	7,7	8,5

Legenda:  $R_{c, PG}$  – Tensão de compressão da calda;  $R_c$  – Tensão de compressão da areia

## Conclusão

Com base nos resultados nos vários ensaios realizados, verificou-se que o solo injectado apresenta características gerais de solos cimentícios. Os resultados dos ensaios triaxial realizados permitiram verificar uma evolução do comportamento mecânico da areia injectada por calda cimentícia.

Para a montagem experimental idealizada e ensaios realizados no estudo apresentado nesta dissertação, a recolha de informação do estudo analisado permitiu o desenvolvimento ao nível da montagem experimental, preparação do provete com o solo em estudo e o equipamento para a injeção por permeação. A realização do estudo para diferentes tipos de calda e obtenção das características mecânicas através de diferentes tipos de ensaios.

### **3.9 “An advanced experimental set-up for studying a monodirectional grout injection process” [9]**

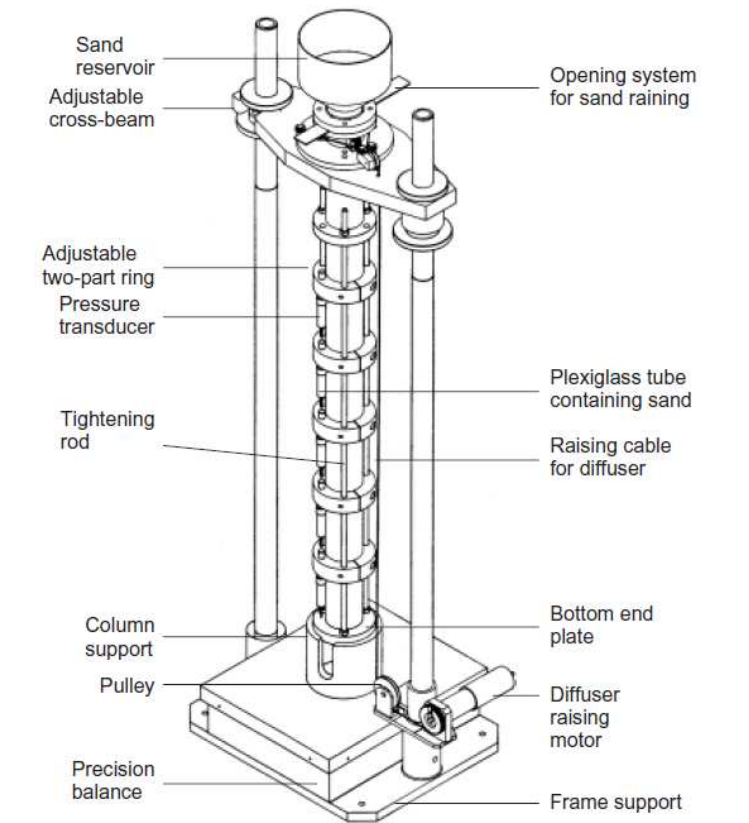
#### **Objectivos e ideias fundamentais**

O estudo apresentado é um processo experimental de injeção monodireccional de calda em areia. O molde apresentado tem como base a chuva de areia para reconstrução de coluna de areia, permitindo obter homogeneidade da areia com densidade controlada e pré-selecionada. O equipamento utilizado permite obtenção de valores da pressão intersticial em cinco pontos equidistantes das colunas, obtendo informação importante para a injeção de calda. No ensaio é utilizado areia com sílica e uma calda cimentícia com bentonite, demonstrando a importância do processo de filtração para a injeção de calda e as propriedades mecânicas do material injectado.

Confore as características do solo a ser tratado são utilizados diferentes tipos de calda, desde caldas químicas a caldas cimentícias com a adição de bentonite e agentes estabilizantes e de dispersão para uma maior estabilidade, assim como o processo de injeção utilizado. Para permitir o sucesso do tratamento do solo, a calda tem de penetrar no solo o máximo possível sem fechar ou bloquear o processo de injeção.

#### **Montagem experimental**

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios é composto uma estrutura de duas colunas fixadas no respectivo suporte, que acomoda a coluna de areia a ser injectada, assim como o aparelho de pluviação que é usado para o preenchimento da coluna. O reservatório do chuveiro é fixado no topo da estrutura. A estrutura montada permite o ajuste em altura podendo colocar-se colunas de diferentes tamanhos. Na base da estrutura é colocado uma balança para registo das variações de massa durante as diferentes fases do ensaio. O esquema da estrutura utilizada para os ensaios está representado na Figura 3.12.



**Figura 3.12 – Esquema da estrutura utilizada para experimentação [9]**

A coluna de areia é construída num tubo de plexiglass com diâmetro interno de 80 mm a uma altura utilizável de 1040 mm. O tubo é equipado com cinco transdutores a níveis equidistantes de 200 mm, para medição da pressão intersticial durante a saturação e na realização da injeção de calda.

A utilização da pulverização da areia torna possível obter uma boa qualidade de amostras muito homogéneas, e a pré-selecção da densidade. O princípio da chuva de areia é a queda controlada de areia a partir dum reservatório superior, com um caudal de massa controlado por um difusor composto por um ou dois peneiros. A altura de pluviação é mantida constante durante o processo de chuva de areia, conforme demonstrado na Figura 3.13. Para uma dada altura de pulverização, quanto maior a intensidade de depósito menor a densidade da areia obtida; para um dado caudal de massa, quanto maior a altura de pulverização maior é a densidade da areia obtida.

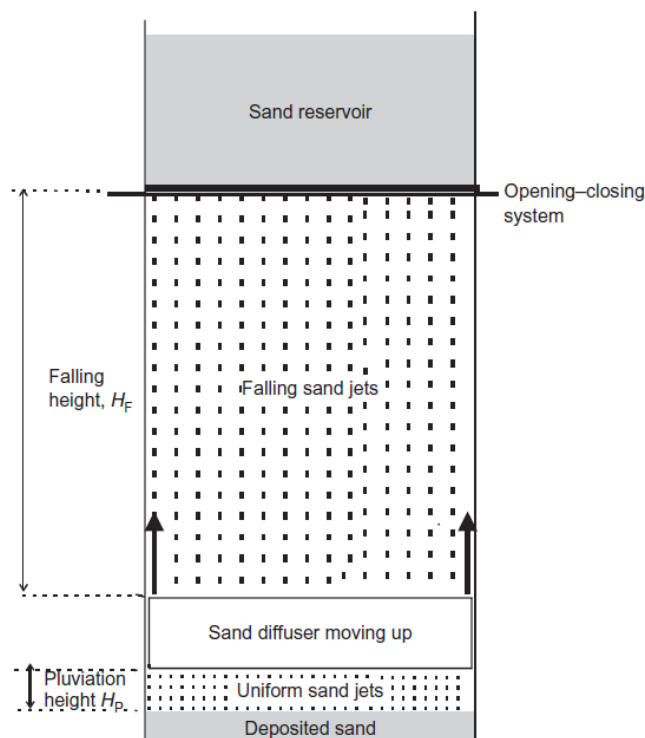


Figura 3.13 – Princípio de chuva de areia [9]

### Solo utilizado

Nos ensaios realizados o solo utilizado é uma areia siliciosa uniforme que é composta por grãos sub-angulares ( $D_{50}=0,99$  mm,  $C_u=1,5$ ), apresentando uma densidade de  $1,65$  Mg/m<sup>3</sup>.

### Injecção de água

A coluna de areia é injectada com água dearificada para sua saturação antes da injeção com calda. A água é injectada através da coluna utilizando o mesmo circuito de injeção de calda. O solo é primeiro atravessado por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a baixa pressão durante 10 minutos, para eliminar o ar presente na coluna. A água dearificada é injectada da base para o topo da coluna de solo, com um caudal de  $2,5$  cm<sup>3</sup>/s utilizando a bomba de injeção. A injeção de água dearificada é concluída quando o volume de água percolado é duas vezes o volume de vazios do solo.

### Injecção de calda

A mistura da calda é realizada através da utilização de uma misturadora, com velocidade de rotação ajustável entre 300 a 3300 rpm, permitindo a preparação até 20 l de calda. Primeiramente, no reservatório é colocada a água, o cimento é colocado progressivamente com a misturadora a funcionar até atingir a razão cimento/água desejada. A mistura é mantida quando da adição de aditivos, alguns minutos depois.

Na preparação da calda é utilizado cimento CLK CEM III/C, com uma distribuição granulométrica de 1 a 100  $\mu\text{m}$  e  $D_{50}=13,6 \mu\text{m}$ . A calda cimentícia é preparado com adição de 4% de bentonite em massa de cimento. A razão cimento/água utilizada na preparação da calda é de 0,4 e a adição de 1% de agente dispersivo. As principais características da calda são, apresenta densidade de  $1,19 \text{ Mg/m}^3$ , viscosidade do cone de Marsh de 35 s, sedimentação de 2,5 % após duas horas. A injecção é realizada com um caudal de  $2,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Após a conclusão da mistura, a calda é colocada num reservatório com uma balança de precisão. A calda é mantida em agitação através dum misturador magnético. A injecção é realizada por uma bomba de diafragma (Dosapro Milton Roy D36K1), que permite a injecção constante da calda com um caudal ajustável entre 0 a  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ . O circuito de injecção é saturado com calda e conectado à base da coluna, começando a partir deste momento a injecção. O procedimento de injecção de calda continua o preenchimento do solo até se verificar um de dois criterios: ou o volume de calda é igual a duas vezes o volume de vazios do solo ou a pressão atinge 1 MPa ao nível da bomba, terminado o processo de injecção perante um dos casos.

## **Conclusão**

O estudo realizado introduz novas questões e respostas na injecção de calda cimentícia como a utilização da pulverização é bastante importante para obtenção de resultados de confiança, pois a heterogeneidade da densidade pode provocar singularidades no processo de injecção. Também a medição da pressão intersticial em cinco pontos a níveis equidistantes da coluna de areia, obtendo informação relativa ao procesos de injecção, permitindo uma melhor compreensão dos resultados obtidos.

Com base nos diferentes aspectos focados e desenvolvidos neste trabalho, utilizou-se como base para o trabalho desenvolvido nesta diserteação o procedimento de preparação da calda cimentícia, assim como o registo da massa do provete antes e depois da realização da injecção.



## 4 Programa Experimental

### 4.1 Equipamento desenvolvido

No sentido de realizar estudo de injeções de calda cimentícias em solos arenosos, e com base nos vários trabalhos estudados já referidos no capítulo anterior, o equipamento e material disponível no LNEC, desenvolveu-se um equipamento que pudesse realizar aquelas injeções em condições controladas.

#### 4.1.1 Interface de controlo de pressão

No desenvolvimento do método experimental, procurou-se idealizar um equipamento para a injeção de calda. O equipamento teria de ter capacidade para armazenar a calda a ser injectada, e ser conectado aos controladores de pressão e volume, tendo em atenção que a água dearificada contida nos controladores não poderia entrar em contacto com a calda.

A solução encontrada com base na investigação de estudos anteriores foi a montagem de duas câmaras em perspex separadas por uma membrana. A câmara inferior têm duas válvulas de 1/8" para ligação aos dois controladores usados na experimentação, preenchida com água dearificada, e com as seguintes dimensões: diâmetro interno de 99,4 mm, diâmetro externo 115,7 mm e altura de 57,15 mm. A câmara superior armazena a calda a ser injectada, tendo as mesmas dimensões. As duas câmaras separadas pela membrana ficam ligadas através de três parafusos tensores e roscas que fazem o aperto na ranhura de ligação.



Figura 4.1 – Interface de controlo de pressão



**Figura 4.2 – Membrana de divisão das câmaras do interface de pressão**

A tampa colocada no topo, representada na Figura 4.3, sela a câmara superior, encaixando na ranhura com o-rings e espessura de 8,4 mm, o aperto é feito através de três roscas de orelha, com um furo de diâmetro de 5,3 mm no centro e uma válvula de 1/8", para a ligação da tubagem e saída da calda a ser injectada.



**Figura 4.3 – Tampa do interface de pressão**

Constatou-se que devido à introdução de água na câmara inferior a membrana deforma-se, assumindo uma forma côncava, chegando a atingir o furo da tampa, impedindo a saída da calda e podendo ocorrer punção da membrana. Por isso foi introduzido uma bolacha metálica com espessura de 4,55 mm e diâmetro 97,7 mm, com seis furos de diâmetro 6 mm e três furos de 4 mm, permitindo assim uma distribuição homogénea da força aplicada pela membrana a toda a calda presente na câmara, evitando a selagem do furo.





**Figura 4.4 – Bolacha metálica no interior do interface de pressão**

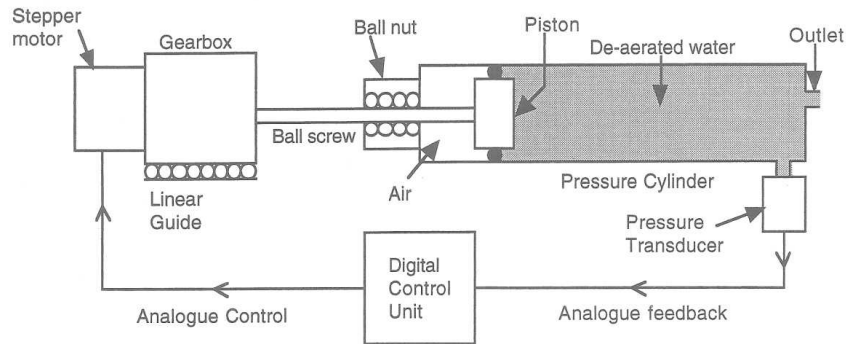
O conjunto no total tem uma altura de 169,42 mm, a base uma espessura de 31,32 mm e a ligação das duas câmaras com a membrana tem uma espessura de 28,87 mm.

#### **4.1.2 Controladores de pressão/volume**

O controlador é um microprocessador de controlo de actuação hidráulica, para regulação precisa e registo da pressão e volume da água dearificada contida no depósito.

Os controladores de pressão/volume são utilizados para controlo da pressão de injeção, através da ligação à base do interface de pressão, aplicando pressão à membrana e causando variação de volume através da introdução de água dearificada. O controlador é programado através do painel de controlo para rampear ou efectuar ciclos de pressão e volume em função do tempo. Estando ligado a um sistema de aquisição de dados, para registo de valores e controlo no programa do equipamento no computador.

A máxima pressão de injeção é de 2 MPa e o máximo volume é de 200 cm<sup>3</sup>. A água dearificada no cilindro do controlador é pressurizada e deslocada por movimento de um piston no interior do cilindro, (cf. Figura 4.5). A pressão no interior é detectada por um transdutor de pressão e registado no painel. Para remover algum ar que possa estar contido no sistema, o controlador é cheio e esvaziado com uma inclinação de 5°.



**Figura 4.5 - Diagrama do layout do controlador**

São utilizados dois controladores, para não ocorrer interrupção da injeção, quando acaba a água no reservatório de um é ligado o outro de seguida, e enquanto um esta a injectar o outro está a re-encher o reservatório.



**Figura 4.6 – Controladores de pressão/volume**

### 4.1.3 Câmara de Injecção

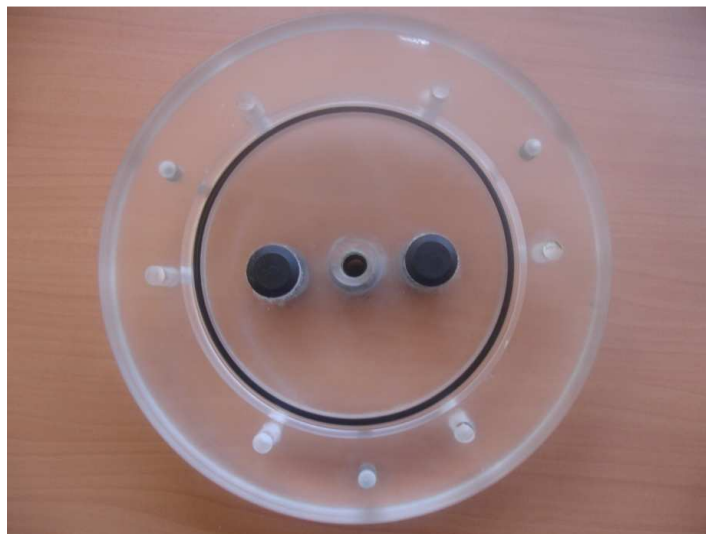
A câmara de injeção que se desenvolveu no âmbito do trabalho, têm como objectivo a injeção dum provete de solo grosseiro sob um estado de tensão de confinamento constante. A injeção de calda é realizada através de um injector central, com vários furos em diferentes direcções ao longo da câmara, para uma dispersão radial uniforme.

Com base nos estudos anteriores, desenvolveu-se uma solução para permitir com facilidade a colocação do solo no interior da câmara e a posterior desmontagem, para remoção do provete uma vez este injectado e colocação no topo da câmara o pedestal, (cf. Figura 4.10), para aplicação da pressão ao solo e selagem do conjunto. O material utilizado é perspex

transparente, para visualização do material e do processo de injeção, observando a permeação da calda no solo.

A câmara de injeção é composta por três partes, cuja montagem é feita através de três parafusos tensores e anilhas para aplicação do aperto necessário para uma boa ligação.

A base tem uma ranhura com uma espessura de 6,1 mm e o-rings para perfeita selagem da câmara sem fugas de materiais. São considerados três furos de diâmetro 8,4 mm no interior e 12,4 mm no exterior, para ligação do tubo injector no interior e ligação da tubagem no exterior, sendo apenas utilizado o central. O diâmetro interno da base para colocação solo é de 99,7 mm.



**Figura 4.7 – Base da câmara**

O encaixe do topo com parafusos tensores que faz a ligação a base e aperto da câmara, tem de diâmetro interno de 100,5 mm e espessura 24,2 mm.



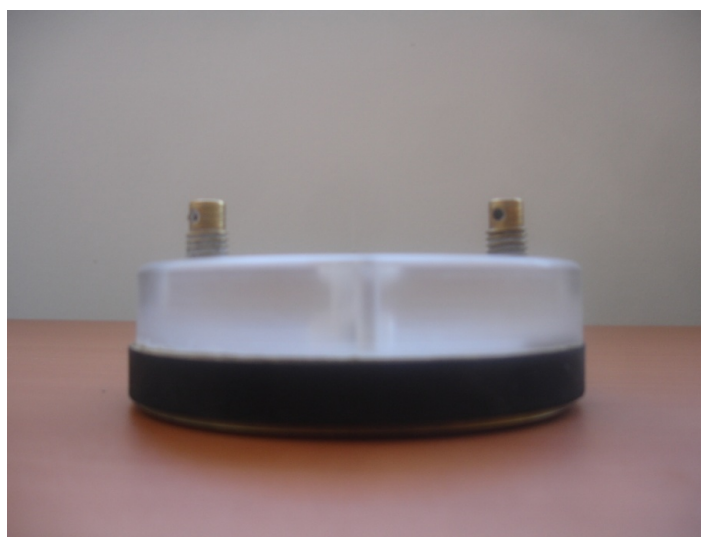
**Figura 4.8 – Topo da câmara**

A função da câmara é a moldagem e acondicionamento do solo, sendo construída em perspex e reforçada com duas braçadeiras de aço envolvendo a parede exterior, tendo de diâmetro interno 100,5 mm, espessura de 5 mm e altura de 103,1 mm.



**Figura 4.9 – Câmara**

O pedestal é colocado no topo para encosto e aplicação de pressão ao material, tendo um diâmetro de 95,04 mm na zona metálica com uma espessura de 2 mm, e a selagem do provete é realizada pelo ajuste da borracha às paredes da câmara tendo um diâmetro de 99,8 mm e espessura de 10,1 mm.



**Figura 4.10 – Pedestal**

O injector no interior da câmara é construído em latão. É composto por sete furos longitudinais de diâmetro de 5 mm e um desvio de  $22,5^\circ$ , para uma dispersão uniforme da calda injectada, e dois furos no topo com diâmetro de 3 mm, para permitir a saída de ar que possa existir no sistema de injeção. O diâmetro interno do injector é de 6,3 mm. Dispõe numa roca inferior para ligação à base da câmara por esmagamento de um o-ring num anel nela chanfrado.



**Figura 4.11 – Injector**

O conjunto, após a montagem, tem as seguintes dimensões, diâmetro interno de 100,5 mm, altura total de 137,2 mm e altura dos três apoios de 104,3 mm.



**Figura 4.12 – Câmara de injeção montada**

#### 4.1.4 Ligações

As ligações existentes na montagem experimental são realizadas de forma a ligar todos os componentes para ocorrer a injeção. A aplicação de pressão por parte dos controladores ao interface de pressão, é transmitida por dois tubos cada um ligado ao seu controlador e respectiva válvula no interface, que apenas é aberta quando está em funcionamento. A ligação do topo do interface à base da câmara é feita por tubagem com diâmetro interno de 6 mm, estando dividida em dois troços um de 50 cm e outro de 15 cm, para reduzir ao máximo a distância entre o interface e a câmara, como demonstrado na Figura 4.13. A interrupção é feita por um cubo em perspex, para ligação transversal dum transdutor de pressão com purga dearificadora, perto da entrada na câmara para registo da pressão de injeção. Dispõe-se uma válvula na tubagem perto da câmara para fecho do circuito quando terminada a injeção.

Na montagem experimental existem também ligações eléctricas entre os instrumentos de medição, ligação do transdutor a caixa de leitura e a ligação dos controladores de pressão/volume a uma caixa de dados que por sua vez está conectada ao computador para registo e controlo das funções dos controladores.



Figura 4.13 – Ligações do interface de pressão a câmara de injeção

#### 4.2 Técnicas experimentais

No trabalho realizado no âmbito do tema da dissertação, foi desenvolvido um procedimento experimental. O procedimento foi testado várias vezes e alterado conforme as dificuldades surgiam e defeitos eram encontrados. Quando se obteve vários resultados de experiências bem sucedidas formulou-se um procedimento final para ser respeitado e seguido para todas as experiências realizadas.



#### 4.2.1 Calibração do conbel

Para a realização da experiência que se propõe, o processo de injecção que se pretende representar, tem-se a necessidade de criar condições que representem a realidade o melhor possível, através da introdução duma pré-carga através dum sistema de confinamento, simulando a tensão geo-estática vertical a uma determinada profundidade a que o ponto de injecção e zona de tratamento pretende simular.

Nesse sentido, procurou-se materializar um sistema de carga que pudesse controlar a força aplicada, tendo-se decidido pela utilização do actuador hidráulico de força (AHF) da marca Karol Warner modelo Conbel nº351, que tem como princípio de funcionamento um prato na base que se desloca até desenvolver, contra um batente fixo no topo, a pressão seleccionada no manómetro, proveniente de fonte de ar comprimido com alimentação contínua, esquematizado na Figura 4.14.



**Figura 4.14 - Esquema experimental de calibração do actuador hidráulico de força (AHF)**

Legenda: 1-Actuador hidráulico de força (AHF), 2-Êmbolo hidráulico, 3-Célula de carga, 4-Controlador GDS

A calibração do actuador hidráulico de força (AHF) e os respectivos cálculos, para converter a pressão aplicada no manómetro do AHF para pressão aplicada no solo na câmara está no Anexo VII . A constante de conversão encontrada foi 15,589 kPa/psi.

#### 4.2.2 Sequência de ensaio

A sequência de ensaio seguida para a injecção da calda cimentícia por permeação em solo arenoso (areia grossa) com injector central.

**.Equipamento:**

- câmara de ensaio;
- actuador hidráulico de força (AHF);
- interface de pressão;
- bolacha metálica perfurada;
- transdutor de pressão;
- caixa de leitura digital de dados;
- deflectómetro;
- controladores de pressão/volume GDS;
- tubo de ligação inferior da câmara (chicote): tubo A;
- tubo de ligação do bloco ao interface de pressão: tubo B;
- bloco do transdutor de pressão;
- tubo de ligação ao transdutor: tubo C;
- computador;

**Materiais:**

- Areia
- Calda cimentícia
- Água dearificada

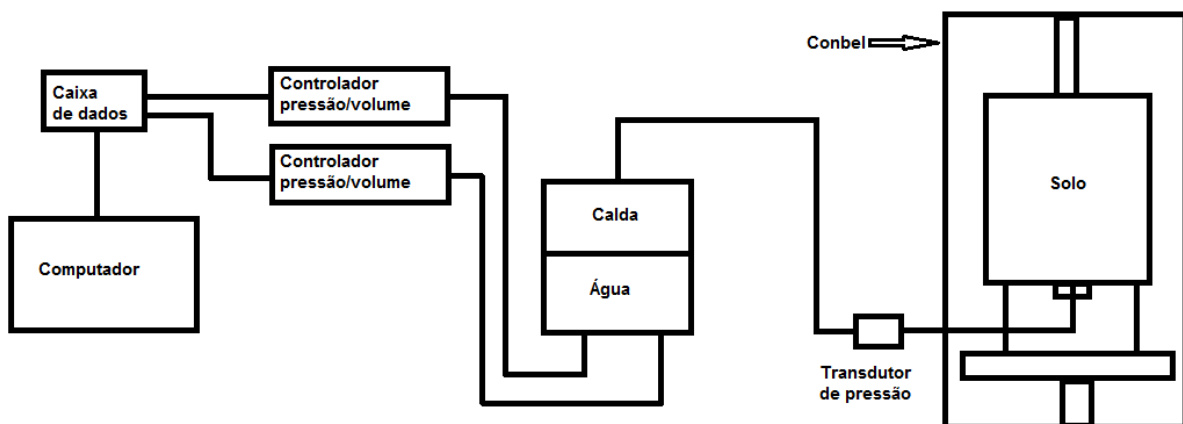


Figura 4.15 – Esquema das ligações



A montagem é realizada da seguinte forma:

1. colocação do injector central na câmara;
2. pesagem da câmara vazia;
3. preenchimento das paredes da câmara com bentonite ou óleo descofrante, conforme os ensaios a realizar;
4. preenchimento da câmara com solo arenoso manualmente, vertendo com uma pá obtendo o peso volúmico desejado, até ao topo e rasado;
5. colocação do pedestal no topo da areia na câmara;
6. pesagem do conjunto, para registo futuro do peso após injeção;
7. colocação do conjunto no prato do conbel;
8. encosto da ponta do deflectómetro na base da câmara e tomada de leitura de referência, aplicação de pressão vertical desejada no manómetro do actuador hidráulico de força (AHF);
9. registo do assentamento inicial devido à carga aplicada, medição da variação da espessura do provete ao longo do tempo durante o processo de injeção e cura do provete;
10. purga e enchimento dos controladores GDS; zeragem da pressão;
11. saturação do bloco do transdutor com parafina líquida, fecho das válvulas, ligação do transdutor à caixa de leitura de dados; leitura inicial com extremo do circuito em contacto com a atmosfera
12. ligação do tubo A;
13. enchimento da câmara inferior do PIC com água de modo a saturá-la e sua pesagem;
14. inicio do programa de aquisição de dados GDS e inscrição do ensaio no ficheiro de registo de dados;
15. ligação dos controladores GDS à base do PIC, cada um na sua válvula;
16. ligação dos tubos B e C ao bloco do transdutor;
17. preparação da mistura de calda cimentícia de 3000 ml seguindo o procedimento respectivo;
18. colocação da calda no PIC com inserção da bolacha metálica furada. Esta só deve ser posicionada após o preenchimento da concavidade criada pela membrana de separação no PIC na base, de modo a precaver a existência de vazios na câmara;
19. fecho do PIC com as três porcas de orelhas nos parafusos exteriores laterais;
20. pesagem do PIC, para determinação da massa da calda nele colocada;
21. ligação do tubo B no topo do PIC e do tubo C na base da câmara, quando a calda preenche a ligação sem a existência de ar;

22. injeção de calda na câmara, aplicando objectivo de 500 kPa no controlador, através do aumento pressão constante ao longo do tempo, pressão máxima correspondente a permeação, expulsão do volume de calda pretendido para preenchimento do volume de vazios existente, duração variável entre 30 e 60 minutos, dependendo das circunstâncias;
23. pesagem do interface de pressão com a restante calda e apenas com a água introduzida pelos controladores;
24. pesagem da tubagem com a restante calda;
25. finalizada a injeção é realizada o fecho da ligação, mantendo a pressão constante, preservando em repouso a câmara no actuador hidráulico de força (AHF) durante cinco horas;
26. pesagem da câmara;
27. passado o tempo de repouso, é retirado o topo e base da câmara, preenchido o orifício do injector com calda, o provete é envolvido em celofane no mesmo recipiente de confinamento, ficando a curar durante os restantes dias perfazendo 5 dias;
28. pesagem do provete;

### **4.3 Materiais**

Para a realização dos ensaios de injeção por permeação de areia, são utilizados vários materiais. Para a composição da calda utiliza-se cimento, água e bentonite.

#### **4.3.1 Caracterização da areia**

A areia utilizada para os trabalhos experimentais foi escolhida com base na informação recolhida na bibliografia, para o objectivo de injeção por permeação a baixas pressões.

A areia utilizada foi adquirida na empresa Areipor Areias Portuguesas Lda, com o código comercial de APAS6 amostra 4878 e APAS4 amostra 4879.

A amostra 4878 é a mais fina das duas amostras, com dimensão das partículas de 4 a 6 mm na maior dimensão e de 2 a 4 mm na menor dimensão. Apresenta uma cor castanha clara e grãos finos rolados, sendo de origem do leito do rio, representada na Figura 4.16.



**Figura 4.16 – Amostra 4878**

A amostra 4879 é mais grosseira que a anterior, com dimensão das partículas de 6 a 13 mm na maior dimensão e de 2 a 6 mm na menor dimensão. Apresenta uma cor castanha escura e grãos grossos com arestas, sendo de origem do leito do rio, representada na Figura 4.17.



**Figura 4.17 – Amostra 4879**

### **Granulometria**

A amostra 4878 apresenta uma distribuição granulométrica em que a maioria da percentagem de material retido é no peneiro #10 e peneiro #4, podendo-se classificar a amostra como uma areia mal graduada (SP) de acordo com a norma ASTM D2487, como está representado no Figura 4.18.

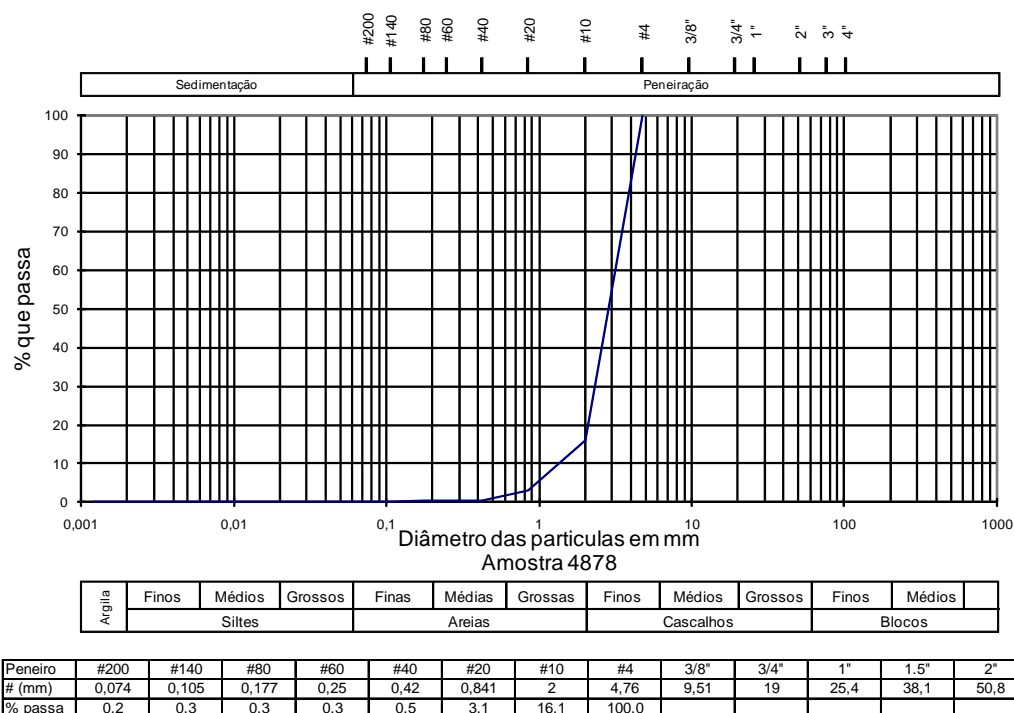


Figura 4.18 - Granulometria da amostra 4878

A amostra 4879 apresenta uma distribuição granulométrica em que a maioria da percentagem de material retido é no peneiro #4 e peneiro 3/8", podendo-se classificar a amostra como areia mal graduada com cascalho (SP) de acordo com a norma ASTM D2487, como está representado no Figura 4.19.

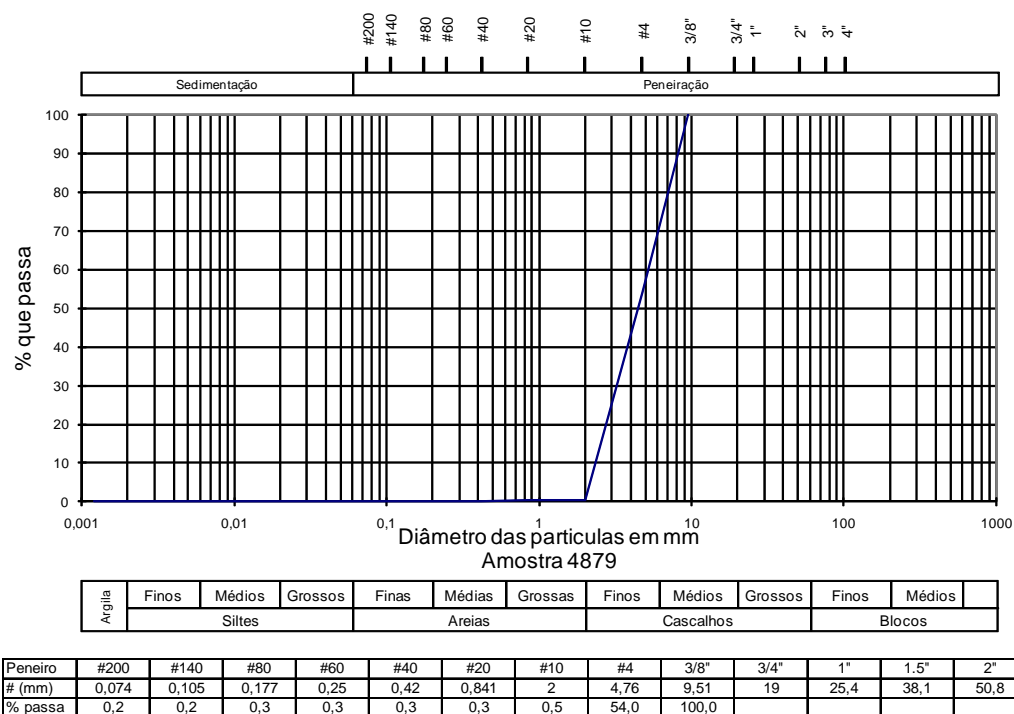


Figura 4.19 - Granulometria da amostra 4879

### Densidade das partículas

O ensaio para determinação de densidade das partículas das duas amostras foi conduzido segundo a norma NP-83, tendo sido obtido para ambas o valor de 2,65 (G), de acordo com os resultados inscritos na Tabela 4.1. Com o resultado do ensaio é possível o cálculo do índice de vazios e porosidade do solo que é colocado na câmara de ensaio, sabendo o volume e peso da amostra, através das equações Equação 4.1 e Equação 4.2.

$$e = \frac{G \times V}{P} - 1$$

**Equação 4.1 – Índice de vazios**

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

**Equação 4.2 – Porosidade**

**Tabela 4.1 – Ensaio densidade das partículas**

Ensaio			
Designação	Símbolo	Amostra	Amostra
		4879	4878
		92	3
Picómetro + Água Destilada (g)	m3	1529,92	1529,92
Picómetro + Provete + Água Destilada (g)	m5	1592,13	1592,23
Cápsula Nº	-	35 NM	2 NM
Cápsula (Massa) (g)	-	21,6	21,3
Provete Seco + Cápsula (g)	-	121,42	121,20
Provete Seco (g)	m4	99,82	99,9
Temperatura do Ensaio (°C)	t	28	28
Razão entre as Densidades da Água a Temperatura do Ensaio e a 20°C	K	0,998	0,998
Densidade das Partículas	d	2,65	2,65

$$d = K \frac{m4}{m3 - (m5 - m4)}$$

**Equação 4.3 – Densidade das partículas**

### Peso volúmico

Foi realizado o ensaio para determinação do peso volúmico das duas amostras em estudo, que são colocadas na câmara de injeção. Tendo-se obtido o resultado para amostra 4878 de 14,78 kN/m<sup>3</sup> e para amostra 4879 de 14,51 kN/m<sup>3</sup>, demonstrado no Anexo VII.

### Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade dos provetes de ambas areias, após a colocação no molde, foi determinado através de ensaio de carga constante. O ensaio de permeabilidade foi realizado numa câmara envolvida com bentonite, para não ocorrer passagem de água entre a amostra e a parede da câmara, e colocação de filtros e placas porosas no topo e base da amostra, Figura 4.20.



Figura 4.20 – Câmara de ensaio preenchida com a amostra 4878

O ensaio é realizado através da ligação da base da câmara a um depósito de água com carga constante e alimentação contínua, e registo da quantidade de água que sai no topo da câmara. O esquema de ensaio utilizado para o ensaio de permeabilidade de carga constante está representado na Figura 4.21.

Os dados necessários para os cálculos da permeabilidade são a secção da amostra em estudo (S) de 78,19 cm<sup>2</sup>, espessura (L) de 7,54 cm, sendo aplicado carga hidráulica (h) de 37,7 cm de altura obtendo-se uma constante ( $c=L/S \cdot h$ ) de  $2,56 \times 10^{-3}$ .



**Figura 4.21 – Esquema de ensaio de permeabilidade de carga constante**

Os dados do ensaio e os registos da permeabilidade estão na ficha de ensaio no Anexo II. Tendo-se obtido o valor de permeabilidade da amostra 4878 de  $4,9 \times 10^{-5}$  m/s e da amostra 4879 de  $5,0 \times 10^{-5}$  m/s. Os valores obtidos são semelhantes apesar das diferenças granulométricas entre os solos e permitem concluir que as duas amostras são adequadas para a realização dos ensaios de injecção por permeação.

### **Conclusão**

Após os ensaios realizados para a caracterização das duas amostras, optou-se pela escolha da amostra 4878 para a injecção por permeação. A amostra 4878 é mais representativa dos solos típicos sujeito a tratamento por injecção por permeação com o tipo de calda utilizado neste estudo.

#### **4.3.2 Caracterização da calda**

A composição da calda cimentícia preparada para os ensaios de injecção em solo é constituída por três componentes bentonite, cimento e água. A calda é preparada com uma razão água/cimento/bentonite (A/C/B%), em que a percentagem representa a fracção ponderal da massa de bentonite em relação à massa de cimento. Na realização dos ensaios de injecção preparou-se seis caldas com diferentes rácios e percentagem de bentonite, descritos na Tabela 4.2. Em relação à água utilizada na preparação da calda, foi usada a água da rede pública no LNEC, pois considerou-se ser a água da rede a mais representativa das caldas fabricadas em obra.

Tabela 4.2 – Caldas utilizadas

	2% de bentonite	4% de bentonite
<b>Rácio 2:1 de calda</b>	3000 ml de água, 1500 g de cimento, 30 g de bentonite	3000 ml de água, 1500 g de cimento, 60 g de bentonite
<b>Rácio 3:1 de calda</b>	3000 ml de água, 1000 g de cimento, 20 g de bentonite	3000 ml de água, 1000 g de cimento, 40 g de bentonite
<b>Rácio 4:1 de calda</b>	3000 ml de água, 750 g de cimento, 15 g de bentonite	3000 ml de água, 750 g de cimento, 30 g de bentonite

### Bentonite

É utilizada uma bentonite sódica natural, com a denominação comercial “Pilogel”, de origem de Madrás e Bujarat, na Índia. Fornecida pela firma A. Agostinho, Químicos e Minerais Unipessoal, Lda. A bentonite tem a seguinte formula química empírica  $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$ , apresentando uma cor acastanhada de tom médio, representada na Figura 4.22.



Figura 4.22 – Bentonite Sódica natural [12]

### Cimento

O cimento utilizado na mistura das diferentes caldas, é um CEM IIB-L 32,5 N da CIMPOR (Pedreira de Alhandra). É composto por silicatos de cálcio, aluminatos e ferroaluminatos de cálcio e pequenas quantidades de óxido de cálcio, óxido de magnésio, sulfatos de sódio, potássio e cálcio e ainda traços de outros elementos. Os parâmetros físico-químicos são descritos nos pontos seguintes.



## Constituintes

O cimento é constituído por clínquer de cimento portland com a percentagem de 65% a 79 % da massa, por calcário com a percentagem de 21% a 35% e sulfato de cálcio regulador de presa.

## Características físico-químicas:

Segundo a ficha de dados de segurança (08/04/2010) fornecido pelo fabricante de cimento as características físicas do cimento são:

- dimensão média das partículas de 5 a 30  $\mu\text{m}$ ;
- solubilidade em água ( $T=20^\circ\text{C}$ ), residual (0,1 – 1,5 g/l);
- massa volúmica, real 2,75 – 3,20  $\text{g/cm}^3$ , aparente (baridade) 0,9 – 1,5  $\text{g/cm}^3$ ;
- pH ( $T=20^\circ\text{C}$  em água), 11- 13,5;
- ponto de ebulição/fusão  $>1250^\circ\text{C}$ ;
- superfície específica, tipicamente entre 3000 – 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  (Blaine)
- expansibilidade (mm)  $\leq 10$ .

As características mecânicas do cimento são: resistência à compressão simples (valores mínimos) a 7 dias de 16,0 MPa e a 28 dias de 32,5 MPa.

### 4.3.3 Procedimento de preparação da calda cimentícia

A calda a ser preparada é com uma razão água/cimento/bentonite (A/C/B%), em que a percentagem representa a fracção ponderal da massa de bentonite em relação à massa de cimento.

A realização do fabrico das caldas de cimento-bentonite é feita em duas fases principais: a primeira é composta pela hidratação completa da bentonite sódica, seguida da mistura da bentonite hidratada com o cimento. O tempo de hidratação que se adoptou foi de um dia, desta forma garantir que a dispersão e completa hidratação da bentonite. O tempo de mistura e a velocidade de rotação da misturadora são ajustados, tendo em vista o objectivo de obter caldas homogéneas.

O tempo de mistura que se adoptou foi de cinco minutos com a velocidade dois da misturadora mecânica. A misturadora mecânica utilizada é da marca SIEMENS modelo MQ5N2PE com 750 W de potência. O tempo de hidratação e a combinação tempo-velocidade de rotação de mistura foram mantidos válidos para todas as misturas efectuadas.

### **Equipamento:**

- 1) balança com uma precisão de 0,1 g;
- 2) recipiente graduado em ml para medição da quantidade de água;
- 3) esguicho;
- 4) cronómetro;
- 5) recipiente em material resistente à abrasão;
- 6) misturador mecânico de elevada velocidade de rotação;

O procedimento para a realização da calda com bentonite compõe-se das seguintes fases:

- a) pesar a quantidade de bentonite correspondente a 3000 ml de água; medir 2800 ml de água através do recipiente graduado;
- b) colocar cerca de 2800 ml de água no interior do recipiente de mistura; introduzir a bentonite lentamente espalhando-a de forma uniforme sobre a água; misturar com uma vareta apenas para reduzir os grumos maiores;
- c) manter a suspensão em repouso durante 24 horas, tendo o cuidado de vedar o recipiente para evitar a perda de material por evaporação.

Após o período de repouso da suspensão de bentonite, procede-se à preparação da calda de injecção, de acordo com o seguinte procedimento:

- a) pesar a quantidade de cimento correspondente a uma mistura de 3000 ml de água, para o rácio desejado;
- b) medir 200 ml de água através do recipiente graduado, e colocar no esguicho;
- c) adicionar o cimento à suspensão bentonítica e misturar com o auxílio da misturadora mecânica, utilizando a velocidade dois, durante um período de 5 minutos;
- d) No último minuto proceder a limpeza do recipiente de mistura e da misturadora com os 200 ml de água que se encontram no esguicho, perfazendo assim os 3000 ml de calda.

### **Ensaaios**

Após a realização da mistura da calda de injecção são realizados ensaios para caracterização e controlo da mistura final, concretamente o ensaio com cone de Marsh e o de exsudação.

#### **Ensaio com cone de Marsh**

De acordo com a norma NP EN 445 de 2000, verte-se suavemente a calda no cone de ensaio através do peneiro, evitando a formação de bolhas de ar e de modo a encher por completo o cone até a marca de capacidade. Abre-se o orifício e simultaneamente liga-se o cronómetro para registo do tempo necessário para a calda preencha um litro de capacidade

do recipiente. O tempo deve ser medido com incerteza máxima de 0,5 s. Refere-se que o padrão do cone é de  $27 \pm 0,2$  s com água à temperatura de  $21^{\circ}\text{C}$ .



Figura 4.23 – Cone de Marsh

**Equipamento:**

- a) cone de Marsh;
- b) peneiro, com malha de 1,5 mm de abertura;
- c) cronómetro;
- d) recipiente com capacidade de 1 litro.

**Ensaio de exsudação**

Este ensaio consiste na medição da quantidade de água que reflui à superfície de uma calda que foi deixada em repouso, com impedimento da evaporação.

**Procedimento**

Equipamento: Proveta cilíndrica transparente, com 100 ml de capacidade, 25 mm de diâmetro e 250 mm de altura, graduada em mm, representado na Figura 4.24.



**Figura 4.24 – Proveta**

## **Resultado**

$$\text{Exsudação (\%)} = \frac{V_1}{V} \times 100 \text{ onde,}$$

### **Equação 4.4 – Exsudação**

$V_1$ , representa o volume à superfície da calda ao fim de três horas, expresso em ml;

$V$ , representa o volume inicial da calda, expresso em ml.

## 5 Experiências realizadas

### 5.1 Injecção por permeação

Com base nos estudos já desenvolvidos presentes na bibliografia, que serviram de base para o trabalho realizado no desenvolvimento do equipamento, escolha do solo e das caldas a serem utilizadas nos ensaios, tomou-se a opção de realizar ensaios que representassem o mais próximo possível a injecção por permeação no terreno.

O objectivo das injecções realizadas é o preenchimento de todos os vazios no solo, conferindo uma diminuição da permeabilidade sendo este o principal objectivo das injecções realizadas no terreno e, secundariamente o aumento da rigidez e resistência do solo. A realização da injecção por permeação é feita a baixas pressões de injecção, de modo a não modificar a estrutura do solo. Todo o procedimento experimental e equipamento utilizado estão descritos no ponto 4.2.2.

Na Figura 5.1 está demonstrada a montagem da experiência de injecção por permeação, sendo que os controladores estão ligados ao interface de pressão, estando também ligados a um computador para registo do volume e pressão. O interface de pressão preenchido com calda, Figura 5.2, é ligado a câmara que contém o solo sobre tensão vertical constante aplicada pelo actuador hidráulico de força, Figura 5.4.



Figura 5.1 – Esquema do ensaio



**Figura 5.2 – Interface de pressão preenchido com calda ligado aos controladores**

Na Figura 5.3, podemos observar no decorrer da injeção por permeação a expulsão da aguadilha de calda pelo topo da câmara de injeção.



**Figura 5.3 – Expulsão de calda pelo topo da câmara de injeção**



**Figura 5.4 – Câmara preenchida com solo e calda após a injeção**

Concluído o processo de injeção que decorre durante 30 a 45 minutos, é realizada a desmontagem de todo o equipamento e respectiva lavagem. Na Figura 5.5 podemos observar o estado final do interface de pressão após a injeção por permeação realizada, verificando a total expulsão da calda existente na câmara.



**Figura 5.5 – Câmara superior do interface de pressão**



Após a realização do ensaio de injecção por permeação e passado o tempo de repouso de quatro horas, Figura 5.4, é realizada a desmontagem do provete. O processo para a desmontagem do provete é executado após retirada do pedestal do topo da câmara, como demonstrado na Figura 5.6.



**Figura 5.6 – Topo do provete**

É retirada a base da câmara e o injector que estava inserido no provete, como demonstrado na Figura 5.7.



**Figura 5.7 – Base do provete**





**Figura 5.8 – Provete desmontado no tabuleiro**

Após concluída a desmontagem do provete este é colocado num tabuleiro, Figura 5.8. O provete é deixado em repouso na câmara de saturação durante o período de tempo estipulado para cada ensaio a realizar posteriormente.

## **5.2 Permeabilidade**

Após a realização da injecção por permeação, os provetes são sujeitos a um ensaio de permeabilidade. Como já foi referido anteriormente, um dos princípios objectivos de injecção por permeação no local é a redução da permeabilidade do solo. O ensaio é realizado com o objectivo de verificar o sucesso da injecção e preenchimento dos vazios existentes.

Para a realização do ensaio de permeabilidade o provete tem de ter uma preparação diferente na câmara de injecção. A parede da câmara de injecção é preenchida com bentonite humedecida com água, formando uma película que envolve o provete, demonstrado na Figura 5.9.



**Figura 5.9 – Preenchimento da câmara de injeção com bentonite**

A aplicação da bentonite permite a desmontagem do provete após a injeção, facilitando a montagem do provete na câmara triaxial. Desta forma não ocorre percolação de água pelas paredes do provete, que poderia alterar os valores obtidos. Para a desmontagem do provete após a injeção também foi utilizado óleo descofrante na realização da injeção de alguns provetes.

A montagem do provete na câmara triaxial é realizada seguindo o procedimento descrito:

- saturação de duas placas porosas, colocadas no topo e base do provete;
- colocação do provete na base da câmara triaxial;
- colocação da membrana de borracha (camisa) para isolamento do provete;
- colocação de dois o-rings de borracha no pedestal, e dois no topo para garantir o isolamento perfeito;
- colocação da placa de topo, e respectiva ao exterior através da utilização de um tubo;
- colocação da campânula da câmara;
- preenchimento da câmara com água.

Após a montagem do provete na câmara triaxial, são ligados dois controladores de pressão/volume e saturados os circuitos de passagem de água. Os controladores de pressão/ volume são utilizados para aplicação de pressão de  $\sigma_3$  30 kPa na câmara e 10 kPa de contra-pressão, na base do provete. Quando se verifica que está estabilizada a percolação de água entre a base e topo do provete são efectuadas leituras do volume que sai do topo do provete e da água introduzida pelo controlador na base do provete, num determinado intervalo de tempo. A Figura 5.10 demonstra a montagem do provete na câmara triaxial para a realização do ensaio.



**Figura 5.10 – Câmara triaxial com provete**

As fichas de ensaio de permeabilidade dos vários provetes, assim como os cálculos realizados para obtenção da permeabilidade, estão no Anexo II .

### **5.3 Compressão diametral**

Para o estudo da melhoria de solos por injeção por permeação, realizaram-se ensaios de compressão diametral. Os ensaios são efectuados para verificar, para os diferentes tipos de calda na injeção por permeação, a resistência à tracção do solo injectado, característica que pode ser determinante na durabilidade do tratamento por permeação efectuado num dado local.

Na preparação dos provetes para a compressão diametral resultantes da injeção por permeação, a câmara de injeção é envolvida por óleo descofrante para auxílio na desmontagem do provete.

Para a execução deste ensaio recorreu-se à NP EN 12390-6 de 2003, segundo a qual o material utilizado para as faixas de posicionamento deve ser aglomerado de madeira. Optou-se por não utilizar o posicionador previsto na norma, devido às dimensões dos provetes ensaiados. Na norma é referido que os provetes devem ser cilíndricos, em

conformidade com a EN 12390-1, tendo sido utilizados com altura média de 90 mm e diâmetro de 100 mm, tendo uma relação altura/diâmetro próxima da unidade.

A posição do provete é central na máquina de ensaio, posicionado cuidadosamente as faixas de aglomerado, demonstrado na Figura 5.11. É assegurando que o prato superior está paralelo ao inferior durante a aplicação da carga.



**Figura 5.11 – Ensaio de compressão diametral**

A taxa constante de carregamento que foi seleccionada para aplicação da carga foi de 1 kN por segundo. A aplicação da carga é realizada sem choque e aumentada de forma contínua, à taxa constante referida, até à rotura. Este ensaio foi efectuado no Laboratório de Ensaios do Núcleo de Betões e Cimentos do Departamento de Materiais do LNEC.

Para o cálculo da resistência à tracção é utilizada a seguinte Equação 5.1, em que  $F$  é a carga máxima em Newton,  $L$  é o comprimento da linha de contacto e  $d$  a dimensão da secção entre os pontos de apoio.

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

**Equação 5.1 – Resistência à tracção**

Para a realização do ensaio, preparou-se provetes com as diversas composições em estudo. O tempo de cura utilizado foi de 28 dias para todos os provetes e também 7 e 14 dias para a calda 3:1:2%. Os resultados dos ensaios encontram-se no Anexo III .

## 5.4 Compressão isotrópica

Um dos ensaios realizados para o estudo dos provetes injectados por permeação com calda é o de compressão isotrópica. O objectivo do ensaio é caracterizar a variação de volume do provete quando sujeito a sequências de cargas e descargas.

Para a realização do ensaio é utilizada a câmara triaxial no ensaio de permeabilidade para todos os provetes. Previamente à compressão isotrópica, o provete é saturado. Para isso, após a instalação de percolação franca ascendente por aplicação de contra-pressão na base do provete, é colocada uma célula para registo da evolução da pressão intersticial ligada ao topo da amostra. O processo de saturação é realizado utilizando os controladores de pressão/volume, através do comando “ramp”. As pressões máximas aplicadas no processo de saturação são de  $\sigma_3$  270 kPa na câmara e 250 kPa de Back na base do provete. O processo de saturação tem a duração de 5 dias.

O ensaio de compressão isotrópica é realizado após a saturação do provete. O ensaio é realizado utilizando dois controladores de pressão/volume, um ligado à câmara e o outro à base do provete, este para drenagem sob contra-pressão constante de 250 kPa. Através da programação do controlador radial para aplicação de incrementos e decrementos de pressão com determinada duração. É registado pelo controlador de contra-pressão a variação de volume do provete, isto é do volume de água expelido ou admitido através da linha de contra-pressão, de acordo com a carga aplicada. Igualmente é registada a pressão intersticial no topo do provete.

Na Figura 5.12 está esquematizado a montagem da experiência realizada. O equipamento utilizado para o ensaio é:

- câmara triaxial;
- dois controladores de pressão/volume, preenchidos com água dearificada;
- computador;
- caixa de ampliação de sinal;
- transdutor;
- caixa de leitura.



**Figura 5.12 – Ensaio de compressão isotrópica**

O plano de ensaio é composto por dois incrementos de pressão e duas diminuições de pressão assim como dois patamares de repouso com pressão constante, para estabilização de pressão intersticial.

Na realização dos ensaios de compressão isotrópica ocorreram várias rupturas da membrana que envolvia o provete, assim como elevadas variações da pressão intersticial, e valores de pressão intersticial bastantes acima dos valores de contra-pressão. No sentido de solucionar estes problemas foram se alterando os tempos de carga e descarga assim como as pressões, até se obter um plano de ensaio que permitisse a sua realização sem a ruptura da membrana que envolve o provete. A versão cinco foi a última alteração que se realizou ao plano de ensaio, sendo a utilizada para os novos ensaios a realizar com novos provetes.

Os vários níveis de aumento de pressão e diminuição de pressão e os seus tempos são resumidos nas tabelas da Tabela 5.1. a Tabela 5.5.

**Tabela 5.1 – Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 1**

<b>Contra-pressão (kPa)</b>	<b>Pressão na câmara <math>\sigma_3</math> (kPa)</b>	<b>Pressão na câmara <math>\sigma_3</math> (kPa)</b>	<b>Tempo (min)</b>
250	270	870	150
250	870	870	600
250	870	570	100
250	570	1670	300
250	1670	1670	800
250	1670	270	800

Tabela 5.2 - Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 2

Contra-pressão (kPa)	Pressão na câmara $\sigma_3$ (kPa)	Pressão na câmara $\sigma_3$ (kPa)	Tempo (min)
250	270	870	700
250	870	870	300
250	870	570	200
250	570	1670	1300
250	1670	1670	300
250	1670	270	800

Tabela 5.3 - Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 3

Contra-pressão (kPa)	Pressão na câmara $\sigma_3$ (kPa)	Pressão na câmara $\sigma_3$ (kPa)	Tempo (min)
250	270	670	1800
250	670	670	300
250	670	370	800
250	370	1670	4500
250	1670	1670	300
250	1670	670	1500

Tabela 5.4 - Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 4

Contra-pressão (kPa)	Pressão na câmara $\sigma_3$ (kPa)	Pressão na câmara $\sigma_3$ (kPa)	Tempo (min)
250	270	670	1800
250	670	670	600
250	670	370	1200
250	370	1670	4999
250	1670	1670	500
250	1670	670	2000

Tabela 5.5 - Plano de ensaio de compressão isotrópica versão 5

Contra-pressão (kPa)	Pressão na câmara $\sigma_3$ (kPa)	Pressão na câmara $\sigma_3$ (kPa)	Tempo (min)
250	270	670	2300
250	670	670	300
250	670	370	1400
250	370	1670	6500
250	1670	1670	300
250	1670	670	2400





## 6 Resultados

Os resultados obtidos do sucesso da injeção por permeação são bastante importantes para análise e comparação da injeção no terreno com a injeção recriada no laboratório. Como descrito no capítulo 5 os provetes foram sujeitos a três ensaios distintos, cada um com o seu objectivo, para determinar propriedades do provetes obtidos por injeção por permeação.

### 6.1 Ensaios da calda

Previamente a cada ensaio de injeção por permeação, foram realizados ensaios de controlo das características das diferentes caldas utilizadas. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 6.2.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que a calda 2:1:4% apresenta maior valor de cone de Marsh e menor valor de exsudação, sendo a calda mais estável e de menor fluidez. No extremo oposto de características, a calda 4:1:2% apresenta menor valor de cone Marsh e maior valor de exsudação, sendo a calda menos estável de maior fluidez. A calda que apresenta características intermédias entre as estudadas é a 4:1:4%. Tendo em consideração a sua função na injeção por permeação, o sucesso no preenchimento do solo e o seu custo, a calda 4:1:4% é a preferível.

### 6.2 Injecção por permeação

Os resultados da injeção por permeação estão descritos nas fichas de ensaio cada provete no Anexo I . Em cada ficha de ensaio são descritas todas as condições do ensaio e apresentados os dados registados no decorrer da injeção por permeação.

Em cada ensaio, são realizados ensaios de caracterização prévia da calda para controlo das condições e qualidade da calda a ser utilizada. Também o índice de vazios e a porosidade do provete após colocação na câmara são calculados de acordo com o volume e a massa depositada.

Nas fichas de ensaio é possível verificar a evolução ao longo do tempo da pressão de injeção de calda no solo, da pressão aplicada e do volume injectado pelo controlador ao longo do tempo na câmara inferior, prévia ao interface de pressão, da relação entre a pressão aplicada no controlador e a pressão de injeção na câmara de ensaio e, por último, a massa de calda injectada.

Foram realizados vários ensaios de permeação para as diferentes caldas e para os diferentes ensaios a realizar posteriormente. Os códigos atribuídos às injeções são

compostos por dois números, o primeiro é o número da injeção realizada e o segundo o código do provete relativo à calda utilizada, sendo que cada traço de calda está associado a um código par e a um código ímpar, o segundo referente aos ensaios de compressão isotrópica e o par aos restantes ensaios. Na Tabela 6.1 está descrito a lista de ensaios realizados e a calda utilizada em cada ensaio.

**Tabela 6.1 – Resumo dos ensaios de injeção por permeação**

	<b>2% de bentonite</b>	<b>4% de bentonite</b>
<b>Rácio 2:1 de calda</b>	8-1, 32-1, 16-2	20-3, 33-3, 12-4
<b>Rácio 3:1 de calda</b>	26-5, 28-5, 19-6, 18-7, 9-8	25-9, 30-9, 15-10
<b>Rácio 4:1 de calda</b>	23-11, 31-11, 10-12	21-13, 29-13, 13-14

As injeções por permeação da 28 a 33 foram realizadas sem pré-aplicação de bentonite na parede da câmara de injeção. Tendo sido aplicado óleo descofrante para a desmoldagem do provete que, apresentando uma superfície lisa, permite a realização do ensaio de compressão isotrópica sem ruptura da membrana que envolve o provete na câmara triaxial. A ruptura ocorreu diversas vezes nos provetes obtidos nas injeções anteriores, devido a deformação da bentonite que envolvia o provete, permitindo que grãos de areia rompessem a membrana.

Na amostra de valores (cf. Tabela 6.2) do tempo do cone de Marsh, verifica-se baixa sensibilidade relativamente ao traço da calda. É ainda possível observar uma relativa homogeneidade de tempos nas caldas com um dado traço.

Os valores de índice de vazios da areia obtidos (cf. Tabela 6.2) após colocação na câmara de injeção apresentam variações muito pequenas, demonstrando que o processo de preparação é reprodutível de preparação para preparação.

A percentagem de exsudação é naturalmente influenciada pela razão água/cimento e, em grau de importância semelhante, pela percentagem ponderal de bentonite. Ilustra a eficácia da bentonite na estabilização da calda. Nas caldas com a mesma razão água/cimento mas com percentagens diferentes de bentonite, verifica-se que com o aumento da percentagem de bentonite de 2% para 4% da massa do cimento, a exsudação apresenta uma significativa redução.

Alguma heterogeneidade da percentagem de exsudação poderá dever-se ao facto de a preparação da calda não ter decorrido de forma automatizada.

Com o aumento da fluidez da calda verifica-se uma maior variabilidade da altura regularizada do provete após a desmoldagem. A regularização do provete era realizada

após o período de cura e a sua desmoldagem da câmara, retirando o excesso de calda que possa existir com uma espátula.

Tabela 6.2 - Resumo da informação relevante dos ensaios de injeção

Ensaio	Razão da Calda	Data	Temperatura ambiente (°C)	Cone Marsh (s)	Exsudação (%)	e	H (mm)	Ensaio a que se destina
8-1	2:1:2%	17-09-2010	25	31	16	0,73	96	P, CI
32-1	2:1:2%	10-11-2010	19	31	11	0,76	90	P
16-2	2:1:2%	16-08-2010	24	28	11	0,76	95	T
20-3	2:1:4%	14-09-2010	25	33	4	0,71	91,7	P, CI
33-3	2:1:4%	11-11-2010	19	32	4	0,76	90,1	P, CI
12-4	2:1:4%	09-08-2010	26	36	2	0,76	92	T
26-5	3:1:2%	06-09-2010	24	29	37	0,76	90,7	P, CI
28-5	3:1:2%	28-10-2010	20	29	36	0,76	91,2	P
19-6	3:1:2%	20-08-2010	24	29	39	0,75	91	T
18-7	3:1:2%	19-08-2010	24	29	30	0,76	92	T
9-8	3:1:2%	03-08-2010	24	28	37	0,76	79	T
25-9	3:1:4%	08-09-2010	25	31	10	0,76	89,7	P, CI
30-9	3:1:4%	04-11-2010	19	31	9	0,76	87,9	P
15-10	3:1:4%	13-08-2010	24	31	20	0,76	89	T
23-11	4:1:2%	13-09-2010	25	29	52	0,73	94	P, CI
31-11	4:1:2%	05-11-2010	19	29	48	0,76	92,3	P
10-12	4:1:2%	04-08-2010	25	27	47	0,76	88	T
21-13	4:1:4%	26-08-2010	25	29	38	0,75	68,2	P, CI
29-13	4:1:4%	29-10-2010	19	29	17	0,76	90,3	P, CI
13-14	4:1:4%	10-08-2010	27	30	34	0,76	86	T

Legenda de ensaio: P – permeabilidade; CI – compressão isotrópica; T - tracção

Nos gráficos seguintes ilustra-se a injeção por permeação nº23 dum provete 11. Analisa-se os resultados obtidos como padrão para todos os ensaios realizados.

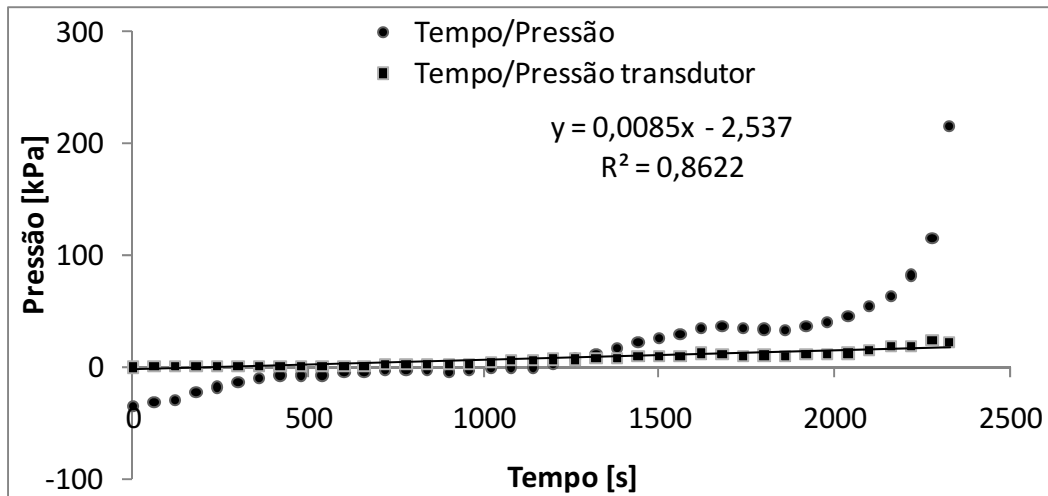


Gráfico 6.1 - Evolução da pressão ao longo do tempo do transdutor e controlador

No Gráfico 6.1 é possível ver o registo da evolução da pressão de injeção por permeação na câmara, e da pressão do controlador aplicado ao interface de pressão. A evolução da pressão do transdutor ao longo do tempo é constante sem grandes alterações e a baixas pressões. Como se pretende numa injeção por permeação para não ocorrer modificação da estrutura do solo e preenchendo o vazios existentes entre as partículas constituintes do solo. A regressão linear permite obter os valores da pressão ao longo do tempo para a injeção por permeação realizada.

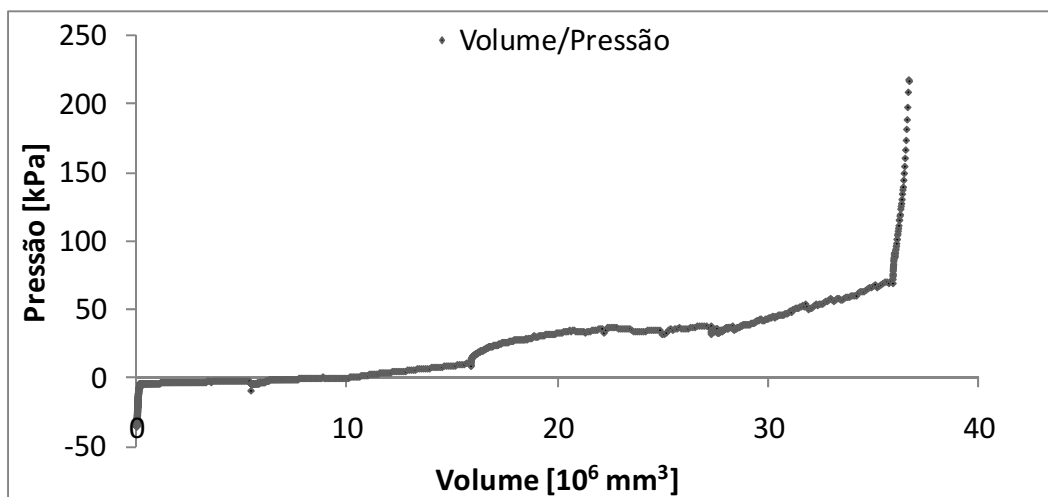


Gráfico 6.2 - Evolução do volume e da pressão do controlador

Na Gráfico 6.2 verifica-se a evolução da pressão e volume da injeção de água dearificada no interface de pressão, para a injeção da calda na câmara superior do interface de pressão na câmara do provete. A pressão no início da injeção apresenta valores baixos e constantes, verificando-se que com o aproximar da membrana ao topo da câmara a pressão

aumenta, devido a dificuldade da restante calda em ser injectada, atingindo o máximo quando já não existe mais calda na câmara.

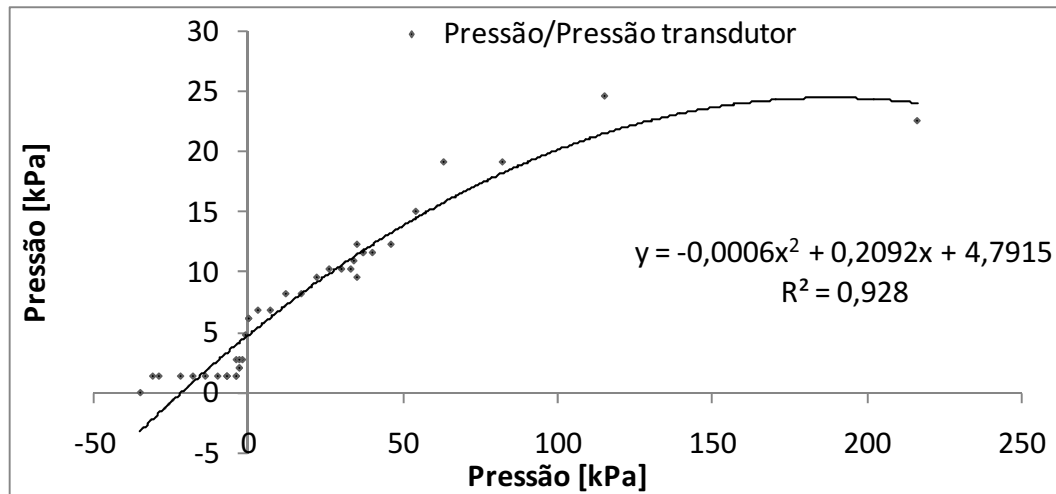


Gráfico 6.3 – Relação de pressão do controlador com a pressão do controlador

No Gráfico 6.3 exemplifica-se a relação entre a pressão do controlador e a pressão do transdutor. Constata-se existir uma estabilização progressiva da pressão de injeção – medida no transdutor – à medida que a calda preenche os vazios da areia. A pressão mobilizada no controlador cresce em consequência da deformação da membrana causar tensão radial (normal à membrana) reactiva que dever ser vencida pela pressão na câmara inferior.







Figura 6.1 – Provete 23-11

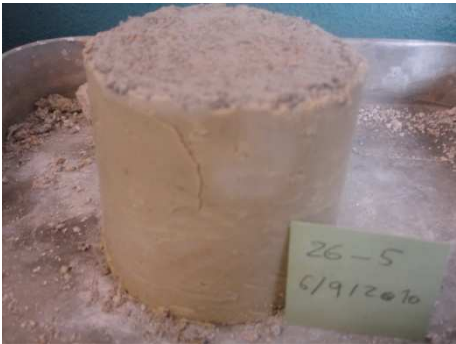




Na Figura 6.1 pode-se observar o provete 23-11 que resultou da injeção por permeação com calda 4:1:2%. O provete não está totalmente preenchido, a principal zona que se encontra sem calda é o topo e as paredes exteriores, ocorrendo devido à elevada fluidez da

calda que é utilizada. A calda apresenta pouca percentagem de cimento e de bentonite, revelando-se instável, com elevada percentagem de exsudação.




Na seguinte Tabela 6.3 apresenta-se uma breve descrição do estado dos provetes após a injecção e o período de cura de cinco dias. Atribuindo-se uma classificação de um a cinco crescente com a qualidade do provete injectado.

**Tabela 6.3 – Descrição dos provetes**

Provetes	Imagem	Descrição	Classificação
8-1		Apresenta total preenchimento homogéneo do exterior, o topo e a base apresentam superfícies regulares.	4
32-1		Apresenta total preenchimento homogéneo do interior e exterior, o topo e a base apresentam lascas e fissuras.	4
20-3		Apresenta total preenchimento homogéneo do exterior, o topo e a base apresentam superfícies regulares.	5
33-3		Apresenta total preenchimento homogéneo do interior e exterior, o topo e a base apresentam superfícies regulares.	5

26-5		Apresenta total preenchimento homogêneo do exterior, o topo e a base apresentam superfícies regulares.	3
28-5		Apresenta total preenchimento homogêneo do interior e exterior, o topo e a base apresentam lascas.	3
25-9		Apresenta total preenchimento homogêneo do exterior, o topo e a base apresentam superfícies regulares.	2
30-9		Apresenta parcial preenchimento do interior e exterior, existindo zonas com vazios, o topo e a base apresentam lascas e fissuras.	2
23-11		Apresenta escasso preenchimento do exterior, com vários vazios, o topo e a base várias zonas lascadas e fissuradas.	2



31-11		Apresenta escasso preenchimento do interior e exterior, com vários vazios, o topo e a base várias zonas lascadas e fissuradas.	2
21-13		Apresenta parcial preenchimento do exterior, com vazios, o topo e a base apresenta zonas lascadas.	3
29-13		Apresenta parcial preenchimento do interior e exterior, com vazios, o topo e a base várias zonas lascadas e fissuras ao longo do provete.	3

### 6.3 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade permitiu verificar a redução de permeabilidade por efeito da injeção com as diferentes caldas, indicando assim o sucesso da injeção e preenchimento dos vazios existentes. Os provetes de areia e calda que são sujeitos a ensaio de permeabilidade estão descritos na Tabela 6.4. Para controlo da calda utilizada, e como referência, foram realizados ensaios de permeabilidade de provetes de calda preparados no mesmo molde com cinco dias de cura.

**Tabela 6.4 – Provetes ensaiados**

	<b>2% de bentonite</b>	<b>4% de bentonite</b>
<b>Rácio 2:1 de calda</b>	8-1, 32-1	20-3, 33-3
<b>Rácio 3:1 de calda</b>	26-5, 28-5	25-9, 30-9
<b>Rácio 4:1 de calda</b>	23-11	21-13, 29-13



As fichas de ensaio e cálculos dos resultados obtidos estão descritos no Anexo II , tendo sido determinada a permeabilidade de cada tipo de calda para comparação.

Na Tabela 6.5 encontra-se o resumo dos resultados obtidos para os diferentes provetes, assim como assim como a razão entre a permeabilidade do provete após a saturação e antes da saturação, e a razão entre a permeabilidade da areia e a do provete depois da injecção por permeação.

**Tabela 6.5 - Resumo de resultados de permeabilidade**

Calda	Proвете	Permeabilidade do provete (m/s)	Proвете	Permeabilidade da calda (m/s)	Permeabilidade do solo (m/s)	Altura da água (cm)	Permeabilidade após saturação (m/s)	Razão de permeabilidade da saturação	Razão de permeabilidade
2:1:2%	8-1	1,4E-09	11-15	3,0E-10	4,9E-05	100	2,8E-09	2,06	35837
	32-1	1,4E-08				500	6,9E-09	0,49	3417
2:1:4%	20-3	6,0E-09	14-16	1,2E-08	4,9E-05	100	1,1E-08	1,77	8057
	33-3	1,1E-08				500	5,4E-09	0,49	4394
3:1:2%	26-5	1,7E-07	17-17	4,8E-09	4,9E-05	100	3,7E-08	0,21	283
	28-5	7,4E-09				500	9,4E-09	1,27	6524
3:1:4%	25-9	1,7E-07	22-18	5,1E-10	4,9E-05	100	1,8E-07	1,01	278
	30-9	7,1E-08				500	6,7E-09	0,09	681
4:1:2%	23-11	9,4E-08	24-19	6,1E-08	4,9E-05	100	2,6E-09	0,03	515
	31-11	-				500	-	-	-
4:1:4%	21-13	1,0E-07	27-20	1,0E-07	4,9E-05	100	-	-	479
	29-13	3,6E-08				500	6,5E-08	1,81	1344

Nota: Razão de permeabilidade de saturação é o quociente entre a permeabilidade após saturação e a permeabilidade após montagem; Razão de permeabilidade é o quociente entre a permeabilidade do provete de areia e do provete após injecção. Recorda-se que os provetes da segunda série (32-1, 33-3, 28-5, 30-9, 31-11 e 29-13) foram preparados sem a cobertura prévia com pasta de bentonite da parede da câmara de ensaio.

A presença da bentonite diminui a permeabilidade da calda, com excepção dos provetes com traço 2:1:2%, o que poderá dever-se a um menor índice de vazios do provete injectado, da melhor penetração da calda e da sua ligação mais próxima aos grãos.

O aumento da razão água/cimento provoca o aumento da permeabilidade, devido a uma maior permeabilidade da calda. O efeito da injecção por permeação, quando executado com qualidade, resulta no total preenchimento do provete, sendo determinante para o sucesso da redução da permeabilidade do provete.

A relação entre a permeabilidade de cada provete e a da calda não é estável, isto é, em determinados provetes obteve-se maior permeabilidade, por exemplo os provetes 8-1 e 26-5, e noutros da mesma ordem de grandeza ou menor os provetes 28-5 e 21-13.

Dos valores obtidos para os diferentes provetes com vários tipos de calda, verifica-se que a diminuição do coeficiente de permeabilidade após injecção situa-se entre 300 e 8000 vezes.

Os valores de permeabilidade ausentes correspondem aos provetes recentemente preparados e, por isso, ainda não ensaiados.

Os ensaios nos provetes de segunda série foram realizados com carga hidráulica cinco vezes superior à dos restantes, o que no caso concreto do material ensaiado não deverá ser causador de alterações internas no provete (afectando marginalmente a permeabilidade medida), dada a força das ligações internas da calda e desta aos grãos de areia.

Finalmente, relativamente aos dados recolhidos é possível verificar que a permeabilidade medida nos provetes injectados depende da qualidade da injecção (variável de calda para calda) e da própria porosidade da calda, pelo que é difícil atribuir méritos exclusivos ao traço da calda.

A calda que apresenta a menor redução de permeabilidade é a 3:1:4% e as de maior são as de traço 2:1:2% e 2:1:4%. A diminuição da permeabilidade em três ordens de grandeza (valor aceitável na pratica corrente) poderá ser obtida com praticamente todos os traços considerados. A adopção de um traço concreto, estará assim dependente da distância de penetração da injecção, aspecto que não foi estudado neste trabalho.

#### 6.4 Compressão diametral





O ensaio de compressão diametral é realizado para verificar o sucesso da injecção por permeação do ponto de vista da durabilidade da calda no que respeita à redução de permeabilidade: quanto menor a resistência à tracção do provete, maior a susceptibilidade à fissuração e ao aumento de permeabilidade. A Tabela 6.6 identifica os diferentes provetes ensaiados e os traços das caldas respectivas.





**Tabela 6.6 – Provetes ensaiados**

	<b>2% de bentonite</b>	<b>4% de bentonite</b>
<b>Rácio 2:1 de calda</b>	16-2	12-4
<b>Rácio 3:1 de calda</b>	19-6, 18-7, 9-8	15-10
<b>Rácio 4:1 de calda</b>	10-12	13-14


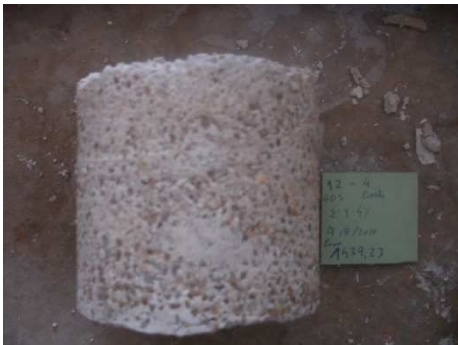


Na Tabela 6.7 e Tabela 6.8 apresenta-se uma breve descrição do estado dos provetes após a injecção e o período de cura de cinco dias, e o seu estado após a compressão diametral. Atribuindo-se uma classificação de um a cinco crescente com a qualidade do provete injectado.

Tabela 6.7 - Descrição antes da compressão



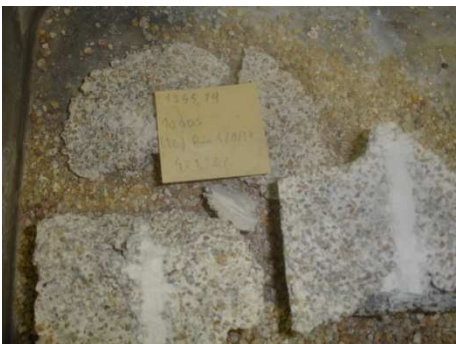

Provetes	Imagem	Descrição	Classificação
16-2		Apresenta total preenchimento homogêneo do interior e exterior, o topo e a base com lascas.	4
12-4		Apresenta total preenchimento homogêneo do interior e exterior, o topo e base regularizadas.	5
19-6		Apresenta total preenchimento do interior e exterior, com alguns vazios, o topo e a base com lascas.	3
18-7		Apresenta parcial preenchimento do interior e exterior, com alguns vazios, o topo e a base com lascas.	3

9-8		Apresenta parcial preenchimento do interior e exterior, com vazios, o topo e a base com várias zonas lascadas. Apesar de ser o que têm mais tempo de cura para esta calda, não apresenta as melhores condições	2
15-10		Apresenta parcial preenchimento do interior e exterior, com vazios, o topo e a base várias zonas lascadas e fissuras ao longo do provete.	3
10-12		Apresenta escasso preenchimento do interior e exterior, com vários vazios, o topo e a base várias zonas lascadas.	1
13-14		Apresenta parcial preenchimento do interior e exterior, com vazios, o topo e a base várias zonas lascadas e fissuras ao longo do provete.	3

**Tabela 6.8 – Descrição após a compressão**

Provetes	Imagem	Descrição	Classificação
16-2		Apresenta total preenchimento homogêneo do interior, sem vazios. A ruptura ocorre na transversal do provete.	4
12-4		Apresenta total preenchimento homogêneo do interior, sem vazios. Não ocorre ruptura do provete, apenas apresenta fissuração.	5
19-6		Apresenta total preenchimento homogêneo do interior, sem vazios, com lascas no topo e base. A ruptura ocorre na transversal do provete.	3
18-7		Apresenta total preenchimento homogêneo do interior, sem vazios, com lascas no topo e base. A ruptura ocorre na transversal do provete.	3



9-8		Apresenta total preenchimento homogéneo do interior, sem vazios, com varias zonas no topo e base com lascas de grandes dimensões. A ruptura ocorre na transversal do provete.	2
15-10		Apresenta total preenchimento homogéneo do interior, sem vazios, com lascas no topo e base. A ruptura ocorre na transversal do provete.	3
10-12		Apresenta total preenchimento homogéneo do interior, sem vazios, com varias zonas no topo e base com lascas de grandes dimensões. A ruptura ocorre na transversal do provete.	1
13-14		Apresenta total preenchimento homogéneo do interior, sem vazios, com lascas no topo e base. A ruptura ocorre na transversal do provete.	3

Na Tabela 6.9 estão descritos os resultados obtidos para os diferentes provetes. Dos dados obtidos verifica-se que a calda que menos resistência apresenta é 4:1:2%, como seria de esperar, visto ser uma calda instável pois menor percentagem de cimento e bentonite quando comparada com as restantes. A que apresenta maior resistência é o provete

preenchido com calda 2:1:2%, que não era o espectável. A calda 2:1:4% é que deveria apresentar uma maior resistência, visto ter maior percentagem de bentonite, logo é uma calda mais estável. A diferença de valores pode ter ocorrido devido ao preenchimento dos vazios do provete ter sido menor, pois a calda 2:1:4% é mais espessa não tendo tanta facilidade a baixas pressões de injeção a total permeação do provete.

Tabela 6.9 – Resultados dos ensaios

Identificação do provete	Data		Idade (dias)	Massa (g)	Dimensões do provete (m)		Força de rotura F (kN)	Tensão de rotura fct (kPa)
	Fabrico	Ensaio			Diâmetro, d	Comprimento, L		
16-2	16-08-2010	13-09-2010	28	1414	0,100	0,095	5,46	368
12-4	09-08-2010	06-09-2010	28	1377	0,100	0,092	3,45	240
19-6	20-08-2010	27-08-2010	7	1435	0,100	0,091	1,55	108
18-7	19-08-2010	02-09-2010	14	1416	0,100	0,092	2,49	172
9-8	03-08-2010	31-08-2010	28	1102	0,100	0,079	1,82	146
15-10	13-08-2010	10-09-2019	28	1254	0,100	0,089	2,34	167
10-12	04-08-2010	01-09-2010	28	938	0,098	0,088	0,22	16
13-14	10-08-2010	07-09-2010	28	1273	0,100	0,086	0,74	55

Podemos também verificar na Tabela 6.9 que os valores obtidos nos provetes com a mesma relação água e cimento e diferente percentagem de bentonite, tem valores da mesma ordem de grandeza. Não sendo muito significativo o aumento de percentagem de bentonite nas caldas utilizadas com objectivo de aumentar a resistência e rigidez do solo.

No Gráfico 6.4 pode-se analisar a evolução da resistência à tracção de três provetes injectados com a calda 3:1:2%, mas com tempos de cura. Dos resultados obtidos observa-se que o valor mais baixo como seria de esperar é o de sete dias de cura. Seria espectável que o valor mais alto de resistência correspondesse ao provete com vinte e oito dias de cura, mas o que se verificou é que o de catorze dias tem o valor mais elevado. O resultado obtido pode dever-se a diferença de massa de calda injectada e o preenchimento dos vazios entre os dois provetes. Como se pode verificar nas fichas de ensaio dos dois provetes que o 18-7 foi preenchido por 391,7 g de calda e o 9-8 por 367,6 g. A diferença de massa de calda injectada pode ser a justificação para a diferença de 26 kPa de resistência observada.

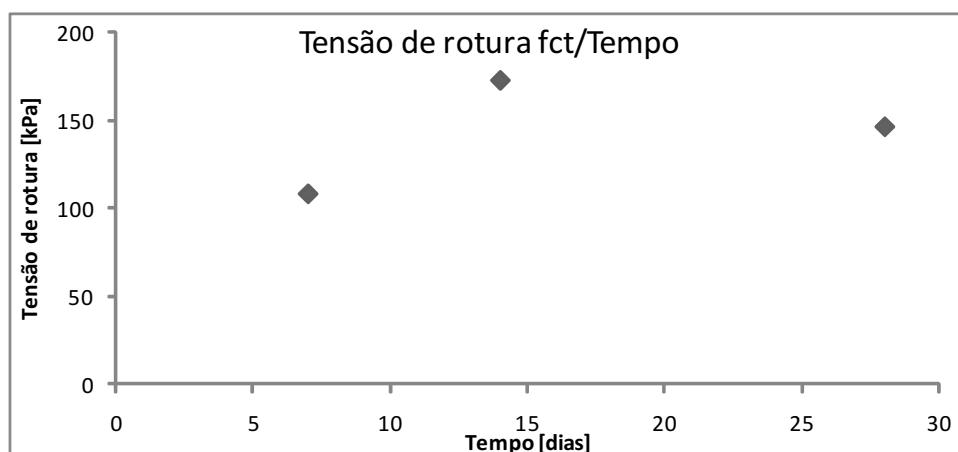


Gráfico 6.4 - Evolução da resistência ao longo do tempo

## 6.5 Compressão isotrópica

O ensaio de compressão isotrópica, permitiu retirar dados da variação de volume do provete quando sujeito a várias cargas e descargas e patamares de carga constante. A Tabela 6.10 apresenta resumido os diferentes provetes sujeitos ao ensaio e a respectiva calda que os constitui. As fichas de ensaio dos diferentes provetes encontram-se no Anexo IV.

Tabela 6.10 - Provetes ensaiados

	2% de bentonite	4% de bentonite
<b>Rácio 2:1 de calda</b>	8-1, 32-1	20-3, 33-3
<b>Rácio 3:1 de calda</b>	26-5, 28-5	25-9
<b>Rácio 4:1 de calda</b>	23-11	21-13, 29-13

Dos ensaios realizados utilizaram-se diferentes planos de carregamento do provete, com cargas e tempos diferentes, até se chegar a um plano de ensaio que permitisse obter os melhores resultados, referido no sub-capítulo 5.4, sem ocorrer ruptura da membrana que envolve o provete e sem elevadas pressões intersticiais.

Na primeira série de ensaios observou-se elevada pressão intersticial assim como elevada variação do volume na carga e descarga, ocorrendo na maioria da vezes ruptura da membrana do provete. Dessa forma, na segunda série de ensaios decidiu-se pela realização da injecção por permeação sem o provete estar envolvidos por bentonite, sendo realizadas injecções com aplicação de óleo descofrante na parede da câmara de ensaio.

Os resultados obtidos permitem a construção de gráficos da variação do índice de vazios conforme o aumento e diminuição da pressão na câmara.



Na Tabela 6.11 encontra-se resumido os valores obtidos dos declives da variação do índice de vazios em relação a pressão radial para os diferentes provetes, e a relação entre a carga e a descarga da primeira e da segunda fase de carregamento.

Para obtenção do índice de vazios inicial ( $ei$ ) do provete teve-se como base os valores obtidos da variação volumétrica da contra-pressão ( $\Delta V$ ) no decorrer da compressão isotrópica assim como o índice de vazios final ( $ef$ ), volume do provete ensaiado ( $Vi$ ), a variação volumétrica final da contra-pressão ( $\Delta Vf$ ). Para tal utilizou-se as seguintes equações descritas.

$$\Delta e = (1 + ei) \times \frac{\Delta V}{Vi}$$

**Equação 6.1 – Variação do índice de vazios**

$$e = ei + \Delta e$$

**Equação 6.2 – Índice de vazios**

$$e = ei + (1 + ei) \times \frac{\Delta V}{Vi}$$

**Equação 6.3 – Resultado da equação 6.1 com a 6.2**

$$ef = ei + \Delta e$$

**Equação 6.4 – Índice de vazios final**

$$ef - \frac{\Delta Vf}{Vi} = ei \times (1 + \frac{\Delta Vf}{Vi})$$

**Equação 6.5 – Resultado da equação 6.3 com a 6.4**

$$ei = \frac{ef - \frac{\Delta Vf}{Vi}}{1 + \frac{\Delta Vf}{Vi}}$$

**Equação 6.6 – Índice de vazios inicial**

O índice de vazios final de cada provete que está indicado na Tabela 6.11 foi obtido pela variação do volume de água após a secagem do provete a 100 °C na estufa durante dois dias. Neste caso o volume de vazios encontrava-se preenchido pela água existente no provete, com os valores do volume da água e volume do provete obtêm-se o índice de vazios.

No Gráfico 6.5 e no Gráfico 6.6, verifica-se a evolução do índice de vazios no interior do provete conforme o aumento e diminuição da pressão na câmara. Os valores obtidos dos declives das rectas de carga representam a compressão normal, de um provete que nunca

antes foi sujeito a esse carregamento. Das rectas de carregamento obtêm-se o parâmetro  $\lambda$ , que representa o declive da compressão normal do provete através da Equação 6.7.

$$\lambda = -\frac{\Delta e}{(\ln p')}$$

**Equação 6.7 - Declive da linha de compressão normal  $\lambda$**

A primeira recta de descarga é a mesma da recarga enquanto a pressão na câmara não ultrapassar o máximo do valor anteriormente experimentado pelo solo, sendo designadas por linhas-k. As linhas-k são linhas onde o comportamento é considerado elástico, apesar de não linear. O declive da recta de descarga-recarga é dado por a Equação 6.8.

$$k = -\frac{\Delta e}{(\ln p')}$$

**Equação 6.8 – Declive da linha de descarga-recarga k**

Dos resultados obtidos na compressão isotrópica, os declives das rectas de carga e descarga, permitem interpretar a variação do índice de vazios do provete. Quanto maior o declive obtido maior é a deformabilidade volumétrica do provete.

O provete que apresenta maior declive do carregamento, logo maior variação do índice de vazios (variação volumétrica) é o 8-1, e o que apresenta menor variação do índice de vazios (variação volumétrica) é o 21-13, relativamente aos provetes da primeira série de ensaios.

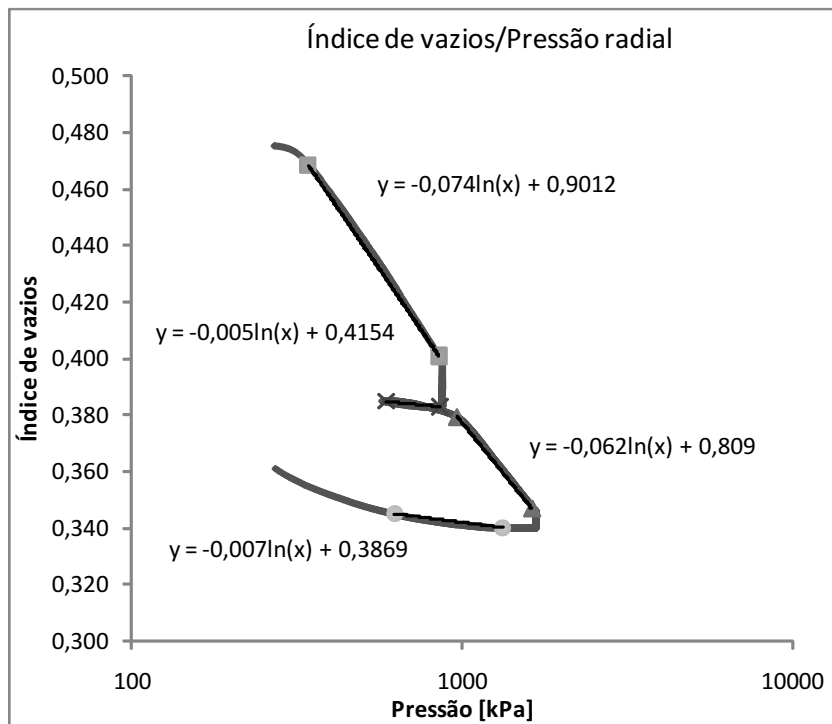
O provete que apresenta a maior razão entre a recta de carregamento inicial e a de descarga e recarga é o 26-5. Apresentado a linha de descarga e recarga sem variação do índice de vazios, podendo-se dizer que para a calda 3:1:2%, o carregamento inicial aplica elevada variação volumétrica, devido a deformabilidade da calda e o insuficiente preenchimento do solo. Podendo-se dizer que a injecção por permeação foi de baixa qualidade.

Tabela 6.11 – Resumo de resultados

Provete	Versão do ensaio	e inicial	e final	$\lambda_1$	K1	$\lambda_2$	K2	Razão 1 entre $\lambda_1$ e k1	Razão 2 entre $\lambda_2$ e k2
8-1	4	0,52	0,38	-0,112	-0,008	-0,0059	-	14	-
32-1	5	0,33	0,29	-0,022	-0,0002	-0,026	-0,0007	110	37,14
20-3	3	0,45	0,25	-0,08	-0,01	-0,05	-	8	-
33-3	5	0,36	0,32	-0,018	-0,002	-0,025	0,0011	9	-22,73
26-5	2	0,32	0,21	-0,08	-0,003	-0,049	-	26,67	-
28-5	5	0,38	0,34	-0,028	-0,005	-0,024	-0,002	5,6	12
25-9	2	0,48	0,35	-0,074	-0,005	-0,062	-0,007	14,80	8,86
23-11	2	0,53	0,44	-0,076	-0,008	-0,045	-	9,50	-
21-13	1	0,50	0,40	-0,06	-0,008	-0,052	-	7,50	-
29-13	5	0,35	0,32	-0,013	-0,002	-0,022	-0,004	6,50	5,50

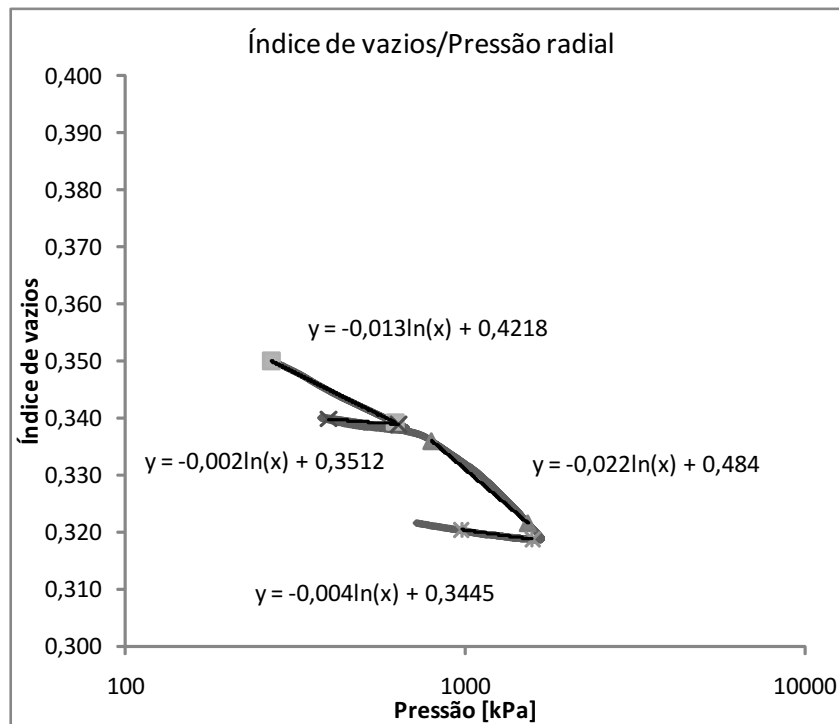
De acordo com a relação do declive da compressão e descompressão, pode-se verificar a sua compressibilidade. Neste caso analisando todos os valores obtidos, o que apresenta maior compressibilidade é o provete 26-5, que é composto pela calda 3:1:2%, sendo das menos estáveis e sem total preenchimento homogéneo do solo. O provete que apresenta o valor mais baixo é o 21-13, que é composto pela calda 4:1:4%, sendo das mais estáveis e com preenchimento homogéneo do solo.

Da primeira série de ensaios com base nos resultados obtidos verifica-se que existe uma redução significativa do índice de vazios do inicial para o final após a realização do ensaio de compressão isotrópica. Relativamente ao índice de vazios do provete antes da injeção por permeação, verifica-se uma redução bastante grande de 0,76 para 0,52 no caso do provete 8-1, que é realizado com a calda 2:1:2%. Neste caso a eficácia da injeção na redução do índice de vazios é menor no provete 26-5, que é realizado com a calda 3:1:2%, sendo a calda menos estável, não permitindo uma injeção com grande eficácia.



**Gráfico 6.5 - Evolução da pressão radial em relação ao índice de vazios do provete 25-9**

Na primeira série de ensaios apenas um provete conseguiu completar o programa de ensaio o 25-9, nesse caso a razão entre a primeira carga e descarga é 14,80, esta razão na segunda carga diminui para 8,86. Verifica-se uma menor diferença entre a carga e a descarga na segunda fase. A evolução do ensaio do provete 25-9 pode ser verificada no Gráfico 6.5.



**Gráfico 6.6 - Evolução da pressão radial em relação ao índice de vazios do provete 29-13**

Na segunda série de ensaios apenas um provete se conseguiu concluir o 29-13, nesse caso a relação entre a primeira carga e descarga é 6,50, esta relação na segunda carga diminui para 5,50. Verifica-se uma maior diferença entre a carga e a descarga na primeira fase. O declive da carga e descarga representa a sua variação do índice de vazios e neste caso o seu volume. A evolução do ensaio do provete 29-13 pode ser verificada no Gráfico 6.6.

Da interpretação dos valores obtidos para os dois provetes concluídos com sucesso o 25-9 e o 29-13, observa-se que a razão entre a linha de carregamento normal e a linha de descarga e recarga da fase inicial é sempre maior que a razão da segunda fase. Apresentando nesta caso uma maior compressibilidade do provete sempre na fase inicial de carregamento.

Comparando os valores obtidos para os provetes com a mesma calda, apenas na primeira fase de carga e descarga, verifica-se que o declive de carga e descarga é maior quando envolvido por bentonite, tendo uma relação superior da primeira fase em relação ao provete que não está envolvido por bentonite.

Podemos concluir que a bentonite que envolve o provete altera os valores de compressão isotrópica, pois apresenta maior declive de compressão e variação do volume, não sendo estável. Facilita a ocorrência de ruptura da membrana que envolve o provete, verificadas diversas vezes. Para os restantes e futuros estudos dos provetes obtidos por injecção por permeação não se deve utilizar bentonite para envolver o provete, mas sim óleo descofrante na câmara de injecção.



## 7 Conclusões

No sentido de atingir os objectivos propostos por este estudo, foi desenvolvido equipamento para realização da injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos, formação do processo experimental a realizar e estudo dos materiais utilizados. A análise dos resultados obtidos da injecção por permeação, permeabilidade, compressão diametral e compressão isotrópica, permitem obter conclusões em diversos pontos.

O desenvolvimento do equipamento para recriar a injecção por permeação, que se realiza no terreno, e o respectivo procedimento experimental permitiu concluir:

- Que o material utilizado para o fabrico do equipamento permite resistir a todas as solicitações de carga a que foi sujeito;
- O princípio de funcionamento através da utilização do interface de pressão para a injecção, permite que possa ser realizada injecção por permeação a baixas pressões, sendo necessário rever as dimensões, para que possa armazenar uma maior quantidade de calda, para utilização de provetes de maiores dimensões;
- A câmara de injecção permite perfeita acomodação do provete e a sua injecção, podendo ser alterada para câmaras de maiores dimensões. Será necessário alterar o pedestal para que possa ter uma purga permitindo a saída de calda do topo.

Os ensaios realizados aos vários provetes permitiram obter várias conclusões relativas à injecção por permeação, tipos de calda e materiais utilizados, designadamente:

- Quanto maior a razão de água/cimento da calda utilizada para injecção por permeação do provete verifica-se o preenchimento dos vazios com elevado sucesso;
- A injecção de calda no provete provoca alteração significativa na permeabilidade, tendo uma maior diminuição quanto maior for o rácio de água/cimento da calda utilizada e quanto maior a fluidez da calda;
- A mesma relação é registada na resistência de compressão diametral, mas não se verifica diferença significativa em relação a percentagem de bentonite utilizada em comparação com o mesmo rácio de água/cimento de calda utilizada;
- Dos ensaios de compressão isotrópica, verifica-se que para as caldas com maior razão de água/cimento, maior é o declive da evolução do índice de vazios em relação a pressão na câmara e uma menor razão entre a carga e a descarga;
- De todos os ensaios pode-se concluir que os provetes injectados pela calda com a razão 2:1:2% e a 4:1:4%, apresentam semelhantes características na injecção por permeação, assim como a permeabilidade e a compressão isotrópica.

Os próximos passos que se deveriam servir o estudo da injeção por permeação, com as mesmas caldas mas utilizando cimento de partículas finas. E diferentes matérias para a composição do provete, com uma granulometria de areia média ou fina.

A continuação do estudo poderá ser realizada para diferentes tipos de solos, analisando o sucesso da injeção de diferentes matérias sobre diversas condições que possam ser alteradas. Realização de ensaios “In-situ” com as mesmas ou semelhantes condições das realizadas em laboratório, analisando as diferenças existentes na realização da injeção em laboratório e no local. O estudo deve também apresentar resultados através da construção de um modelo matemático, que permita obter resultados de análise numérica podendo estes serem validados pelos recolhidos nos ensaios em laboratório e “In-situ”.

Pode-se concluir que é possível recriar em laboratório as condições de injeção por permeação, tal como é descrito nos vários artigos que serviram de base de estudo para o trabalho desenvolvido.



## 8 Bibliografia

1. **Rawlings, C. G., Hellawell, E. E. e Kikenny, W. M.** (2000) *Grouting for ground engineering*. Londres : CIRIA.
2. **Au, S.K. A., Soga, K. Yeung, A. T.** (2005) *A new laboratory apparatus for grout injection studies*. Geotechnical Testing Journal, Vol.29, No.2.
3. **Au, S.K. A., Yeung, A. T. Soga, K.** (2006) *Pressure-controlled cavity expansion in clay*. Canadian Geotechnical Journal, J.43, Vol. 43, pp. 714-725.
4. **Bouchelaghem, F., Vulliet, L., Leroy, D., Laloui, L. and Descoeudres, F.** (2001) *Real-scale miscible grout injection experiment and performance of advection-dispersion-filtration model*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, No.25, pp. 1149-1173.
5. **Kleyner, I., Krizek, R. J.** (1995) *Mathematical Model for Bore-Injected Cement Grout Installations*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No. 11.
6. **Anagnostopoulos, C. A.** (2005) *Laboratory study of na injected granular soil with polymer grouts*. Elsevier Ltd.
7. **Mori, A., Tamura, M. e Fukui, Y.** (1990) *Fracturing pressure of soil ground by viscous materials*. Soils and Foundations Vol.30, No.3, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 129-136.
8. **Dano, C., Hicher, P.-Y. e Tailliez, S.** (2004) *Engineering properties of grouted sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, Vol. 130. 1090-3, pp.328-338.
9. **Dupla, Canou J.-C, J. e Gouvenot, D.** (2004) *An advanced experimental set-up for studying a monodirectional grout injection process*. Paris, France : Vols. 8, No. 3, pp. 91-99.
10. **Chin, C. Y.** (1996) *An experimental study of hydrofracture in soils*. PhD thesis, University of Cambridge.
11. **Elmes, D.R.** (1985). *Creep and viscosity in two kaolin clays*. PhD thesis, University of Cambridge.
12. **Bilé Serra, J., Amade, K., Galhano, C.** (2007) - *Caracterização de uma bentonite sódica industrial*. Relatório 408/2007 – NT, LNEC.

13. **Gouvenot, D.** (1995). “*Silacsol: plus qu’un coulis, un nouveau procédé é d’injection des sols.*” *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, No. 127, pp. 17–25.

# Anexo I

## Boletim de Preparação

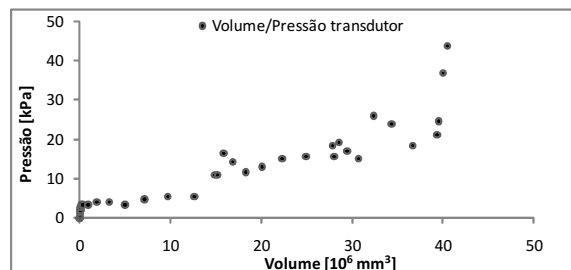
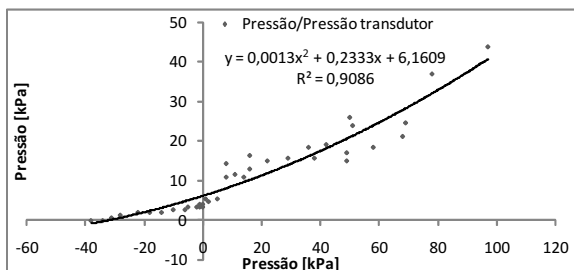
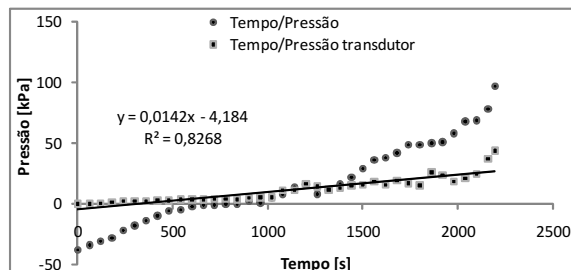
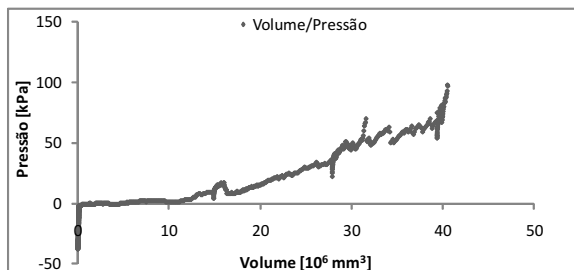
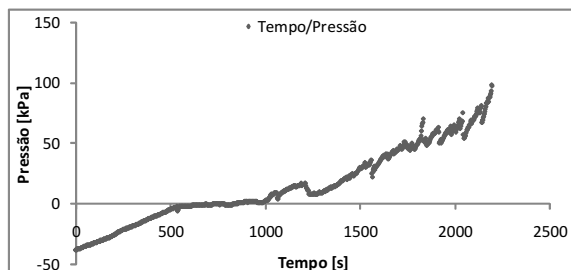
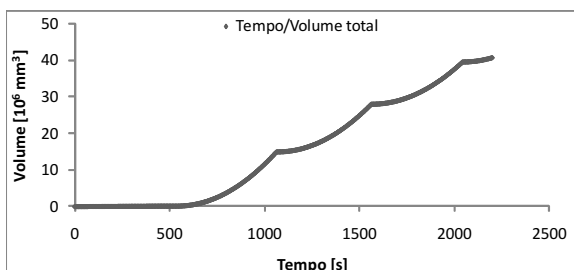
Preparação nº8 Provete nº1	
Data	17-09-2010
Hora	10:00:00
Temperatura ambiente	25
Traço da Calda	2:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2547
Massa do PIC com calda	3354,6
Massa do PIC com a restante calda	3218,4
Massa da câmara vazia	2204,9
Massa da câmara preenchida	3157,1
Massa da câmara injectada	3523
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	630,23
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>365,9</b>
Massa da calda de perdas	430,1
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3095
Massa da areia	952,2
Massa de água a boca	237,84
Massa da calda inicial	807,6
Massa da calda final	123,4
Massa do provete	1412,32

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	31
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	16
Tempo [h]	3
Porosidade (%)	16

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	620,35
Massa [g]	952,20
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,73</b>
<b>Volume de vazios [cm³]</b>	<b>261,03</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,42</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	96
Diametro	100



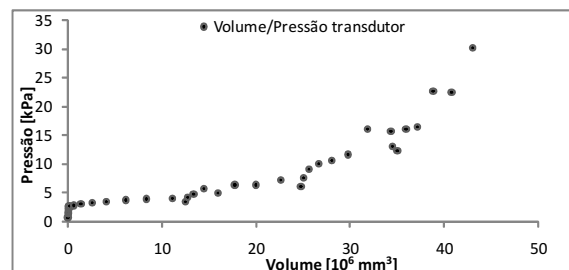
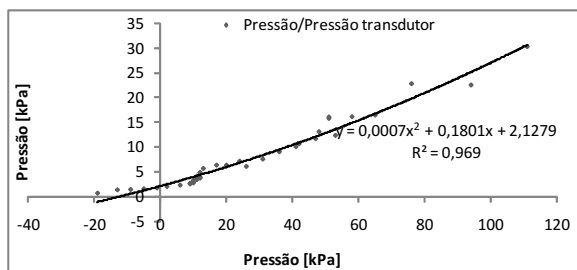
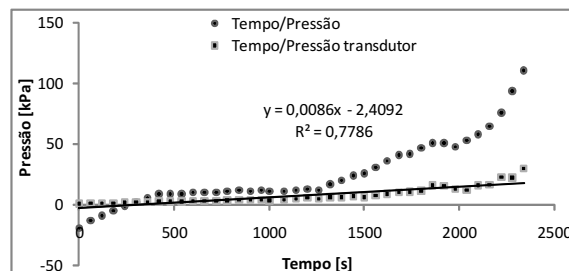
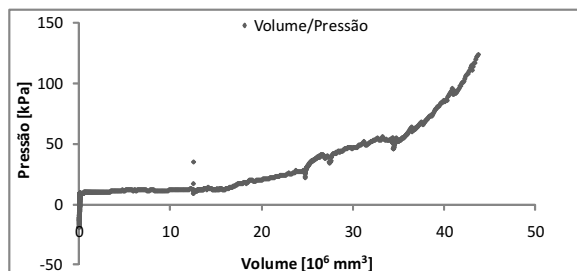
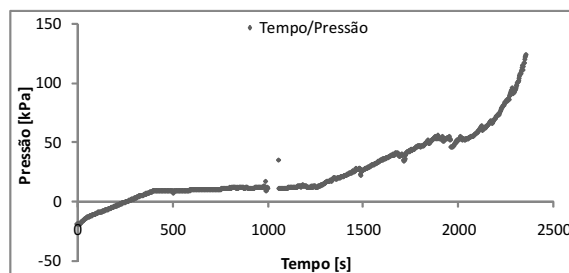
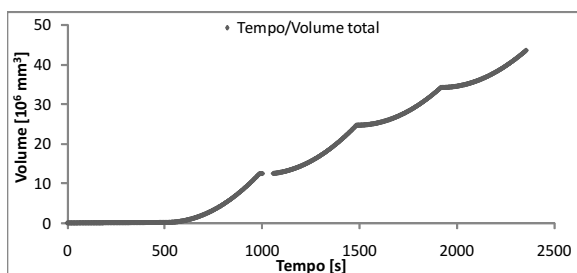
Preparação nº32 Provete nº1	
Data	10-11-2010
Hora	10:30:00
Temperatura ambiente	19
Traço da Calda	2:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2534,7
Massa do PIC com calda	3362,35
Massa do PIC com a restante calda	3190,8
Massa da câmara vazia	2061,2
Massa da câmara preenchida	3107,7
Massa da câmara injectada	3515,2
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	630,27
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>407,5</b>
Massa da calda de perdas	396,87
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3145,2
Massa da areia	1046,5
Massa de água a boca	282,37
Massa da calda inicial	827,65
Massa da calda final	45,6
Massa do proveto	1458,99

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	31
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	11
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	11

Solo	
G	2,65
Volume [cm <sup>3</sup> ]	695,66
Massa [g]	1046,50
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>300,75</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	90,2
Diametro	100,6



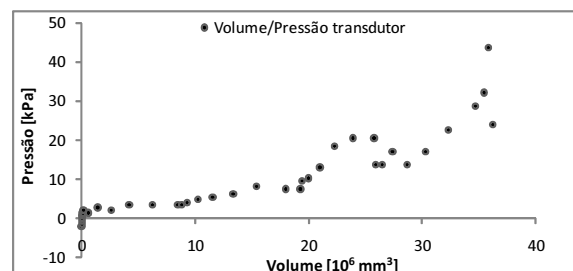
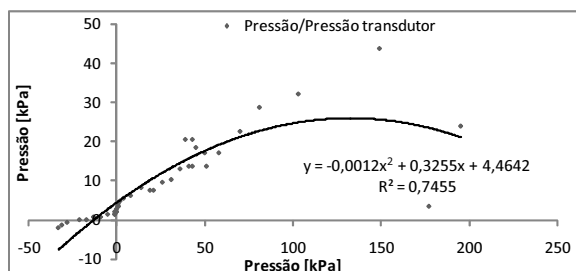
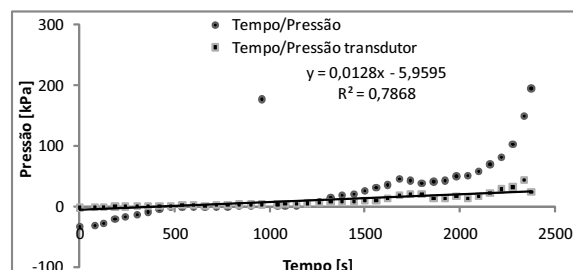
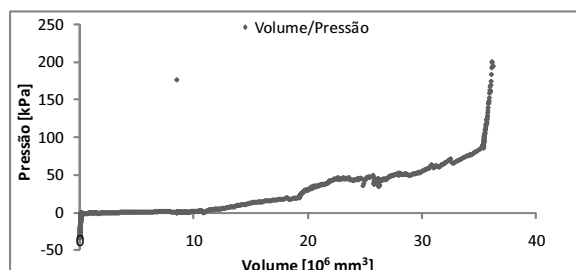
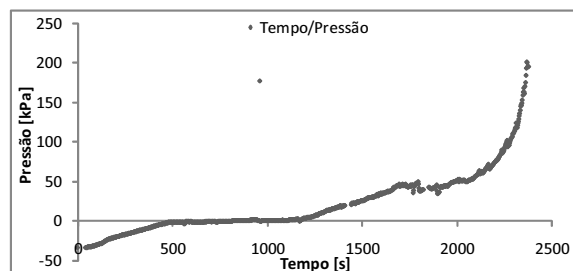
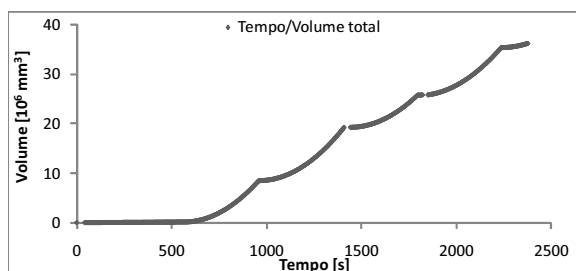
Preparação nº16 Provete nº2	
Data	16-08-2010
Hora	09:30:00
Temperatura ambiente	24
Traço da Calda	2:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2536,9
Massa do PIC com calda	3360,35
Massa do PIC com a restante calda	3187,9
Massa da câmara vazia	2071,7
Massa da câmara preenchida	3118,6
Massa da câmara injectada	3539,4
Massa da tubagem vazia	583,67
Massa da tubagem cheia	630,84
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>420,8</b>
Massa da calda de perdas	355,02
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3151,4
Massa da areia	1046,9
Massa de água a boca	271,35
Massa da calda inicial	823,45
Massa da calda final	36,5
Massa do proveto	1414

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	28
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	11
Tempo [h]	3
Porcentagem (%)	11

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1046,90
Índice de vazios	0,76
Volume de vazios [cm³]	300,60
Porosidade	0,43

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	95
Diametro	100



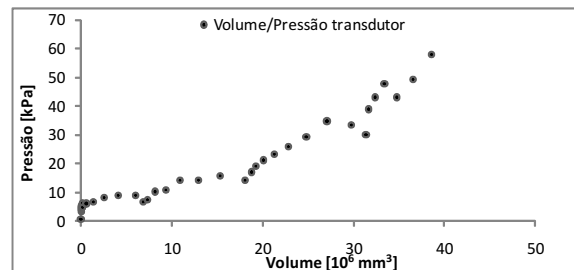
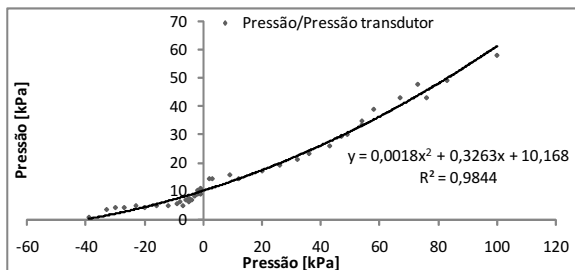
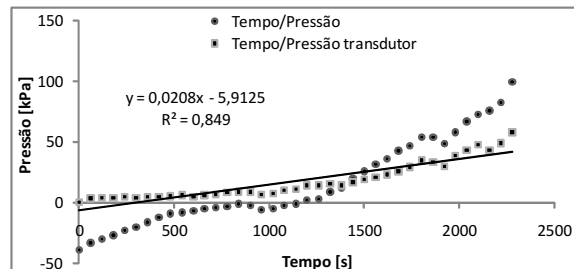
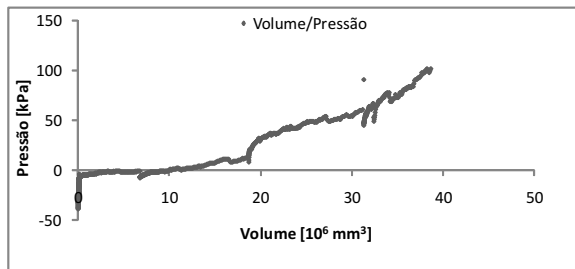
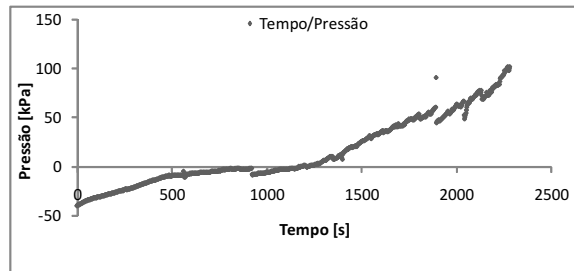
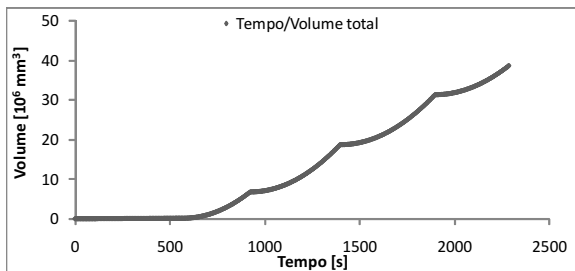
Preparação nº20 Provete nº3	
Data	14-09-2010
Hora	10:00:00
Temperatura ambiente	25
Traço da Calda	2:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2532,8
Massa do PIC com calda	3367,85
Massa do PIC com a restante calda	3183,3
Massa da câmara vazia	2166,8
Massa da câmara preenchida	3129,2
Massa da câmara injectada	3508,3
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	628,68
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>379,1</b>
Massa da calda de perdas	437,53
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3111,6
Massa da areia	962,4
Massa de água a boca	298,52
Massa da calda inicial	835,05
Massa da calda final	71,7
Massa do proveto	534,6

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	33
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	4
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	4

Solo	
G	2,65
Volume [cm <sup>3</sup> ]	620,35
Massa [g]	962,40
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,71</b>
<b>Volume de vazios [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>257,18</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,41</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	91,7
Diametro	100



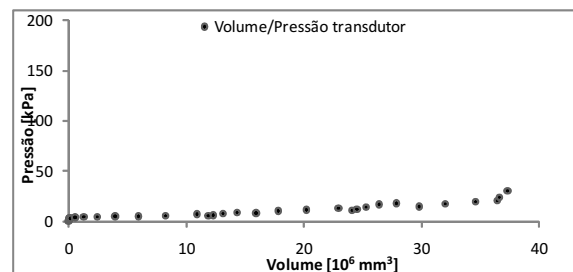
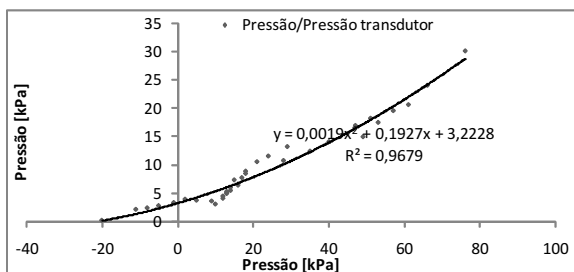
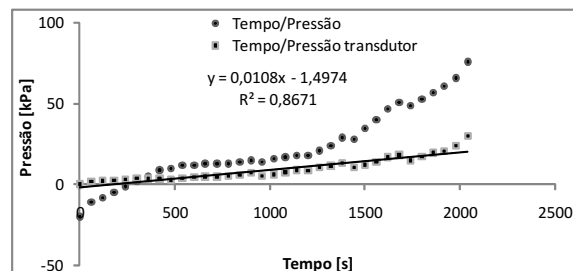
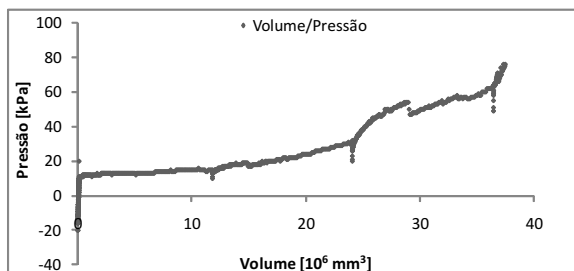
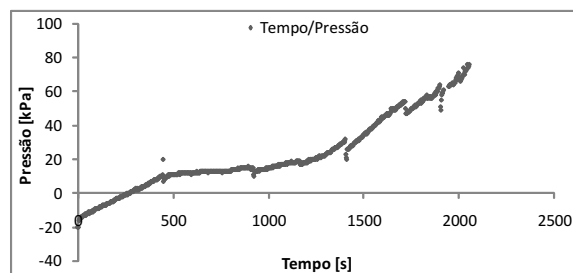
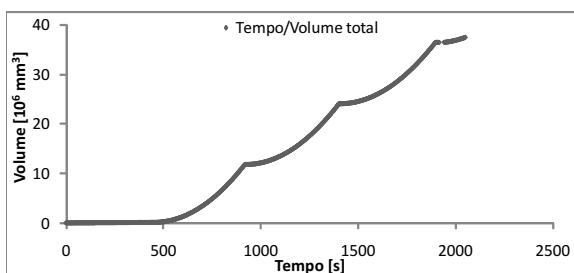
Preparação nº33 Provete nº3	
Data	11-11-2010
Hora	10:30:00
Temperatura ambiente	19
Traço da Calda	2:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2535,4
Massa do PIC com calda	3367,25
Massa do PIC com a restante calda	3216,7
Massa da câmara vazia	2077,4
Massa da câmara preenchida	3124
Massa da câmara injectada	3514,7
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	627,82
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>390,7</b>
Massa da calda de perdas	432,6
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3061,3
Massa da areia	1046,6
Massa de água a boca	210,75
Massa da calda inicial	831,85
Massa da calda final	155,4
Massa do proveto	1433,36

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	32
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	4
Tempo [h]	3
Porcentagem (%)	4

Solo	
G	2,65
Volume [cm <sup>3</sup> ]	695,66
Massa [g]	1046,60
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>300,71</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	90,1
Diametro	100,4



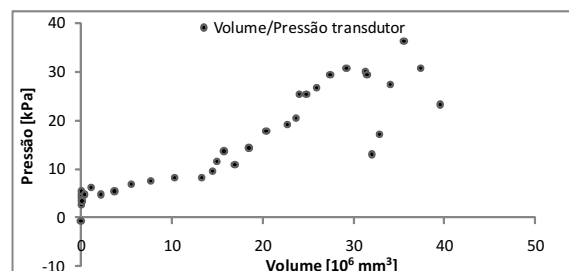
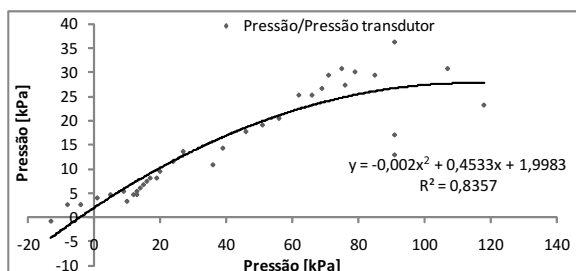
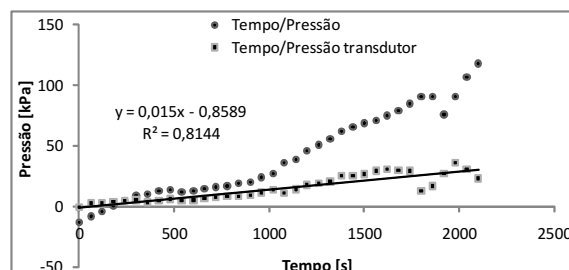
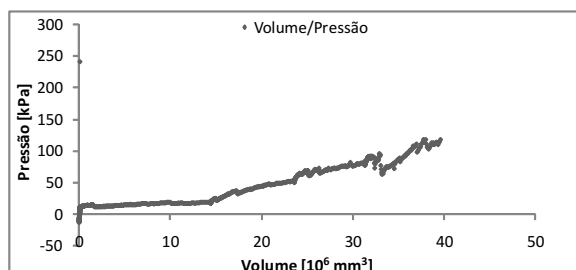
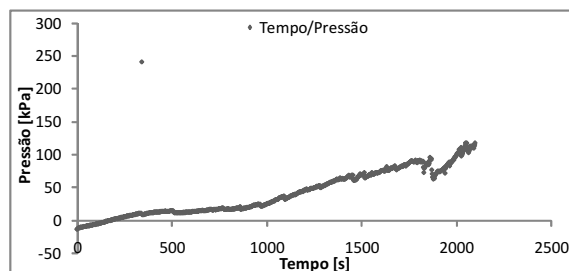
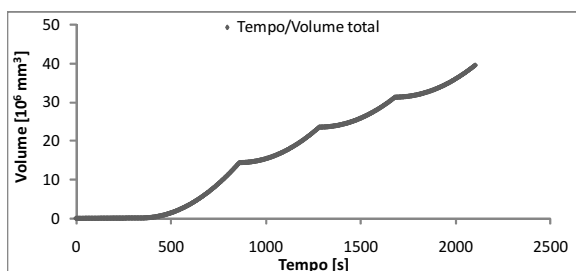
Preparação nº12 Provete nº4	
Data	09-08-2010
Hora	09:30:00
Temperatura ambiente	26
Traço da Calda	2:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2584,8
Massa do PIC com calda	3342,15
Massa do PIC com a restante calda	3186
Massa da câmara vazia	2053,3
Massa da câmara preenchida	3101,4
Massa da câmara injectada	3497,8
Massa da tubagem vazia	583,67
Massa da tubagem cheia	624,11
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>396,4</b>
Massa da calda de perdas	289,17
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3124,2
Massa da areia	1048,1
Massa de água a boca	186,93
Massa da calda inicial	757,35
Massa da calda final	61,8
Massa do provete	1377

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	36
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	2
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	2

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1048,10
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm³]</b>	<b>300,15</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do provete [mm]	
Altura	92
Dímetro	100





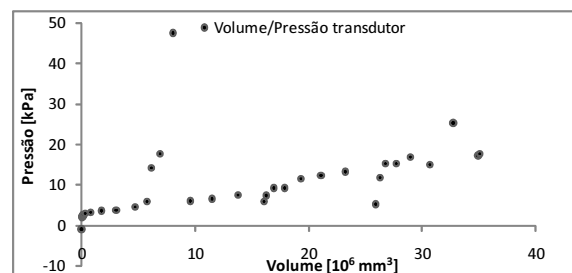
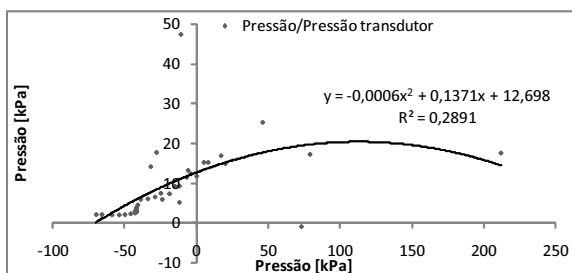
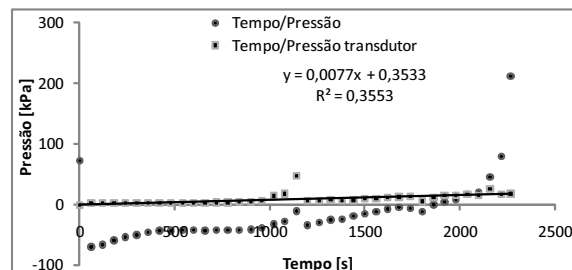
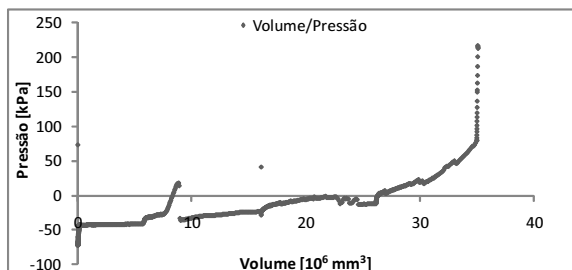
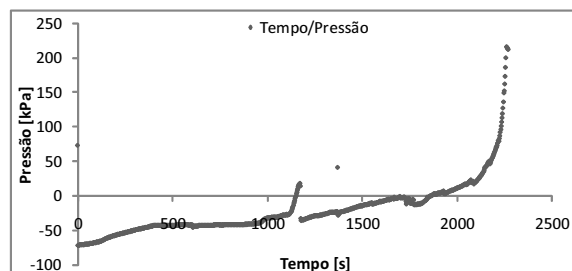
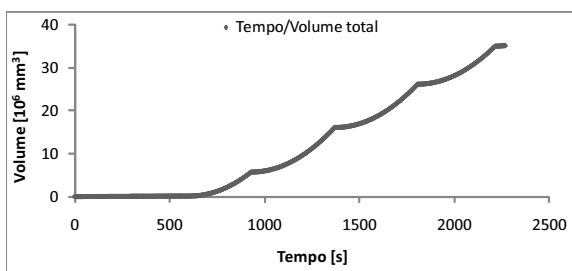
Preparação nº26 Provete nº5	
Data	06-09-2010
Hora	10:00:00
Temperatura ambiente	24
Traço da Calda	3:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2544,7
Massa do PIC com calda	3322,3
Massa do PIC com a restante calda	3188,2
Massa da câmara vazia	2167,7
Massa da câmara preenchida	3101,6
Massa da câmara injectada	3442,6
Massa da tubagem vazia	451,32
Massa da tubagem cheia	497,41
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>341</b>
Massa da calda de perdas	369,27
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3157,4
Massa da areia	933,9
Massa de água a boca	292,38
Massa da calda inicial	777,6
Massa da calda final	30,8
Massa do provete	1339,21

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	29
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	37
Tempo [h]	3
Porcentagem (%)	37

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	620,35
Massa [g]	933,90
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm³]</b>	<b>267,94</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do provete [mm]	
Altura	90,7
Dímetro	100



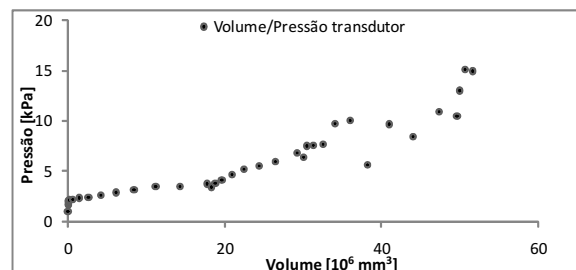
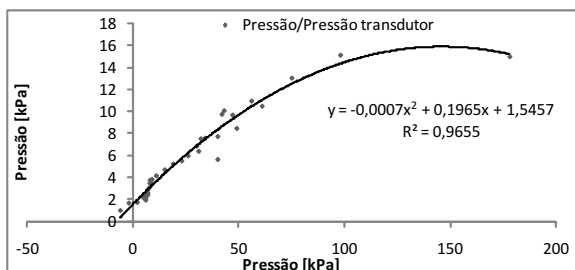
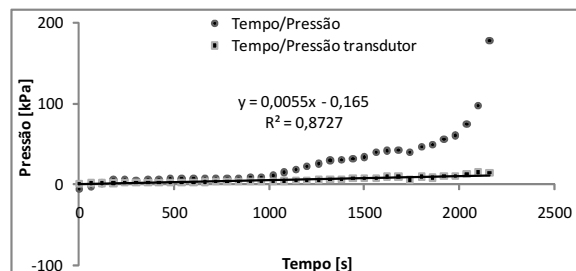
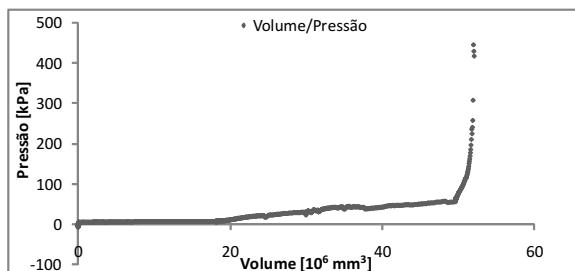
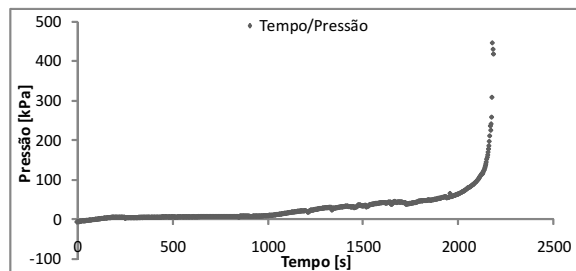
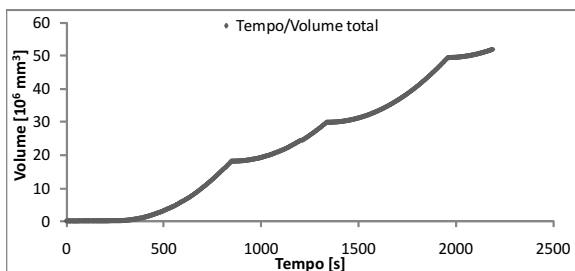
Preparação nº28 Provete nº5	
Data	28-10-2010
Hora	10:30:00
Temperatura ambiente	20
Traço da Calda	3:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2551
Massa do PIC com calda	3310,65
Massa do PIC com a restante calda	3182,4
Massa da câmara vazia	2055,7
Massa da câmara preenchida	3102,4
Massa da câmara injectada	3498,4
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	628,43
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>396</b>
Massa da calda de perdas	335,64
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3154,5
Massa da areia	1046,7
Massa de água a boca	240,68
Massa da calda inicial	759,65
Massa da calda final	27,9
Massa do proveto	1434,26

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	29
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	36
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	36

Solo	
G	2,65
Volume [cm <sup>3</sup> ]	695,66
Massa [g]	1046,70
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>300,68</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	91,2
Diametro	100,8



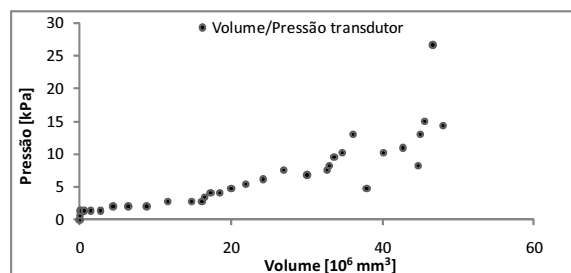
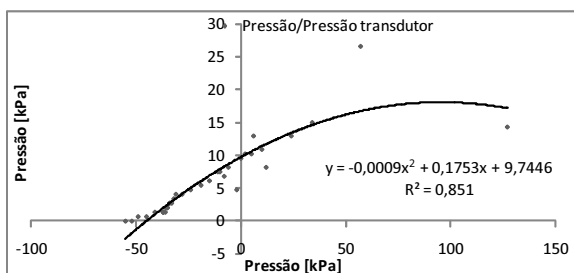
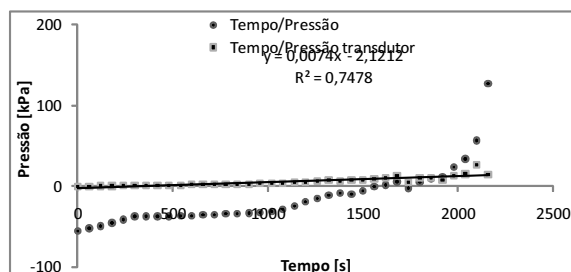
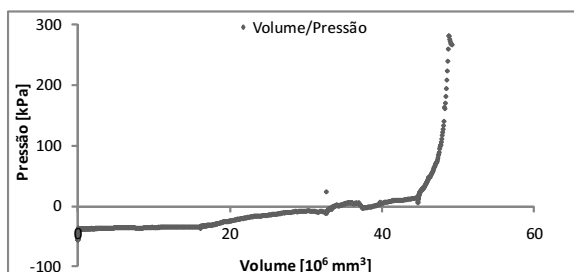
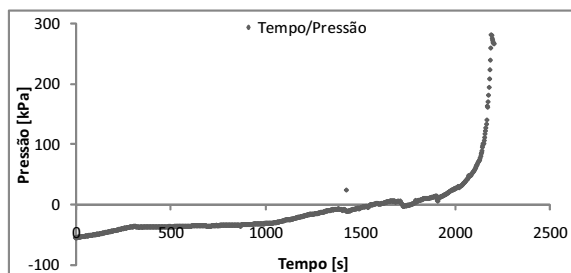
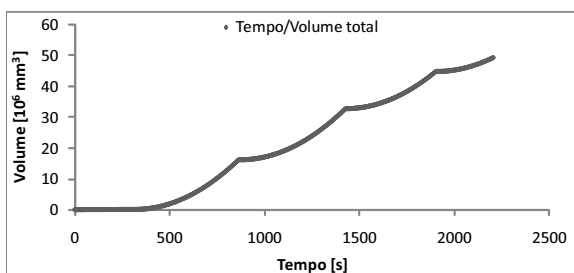
Preparação nº19 Provete nº6	
Data	20-08-2010
Hora	10:30:00
Temperatura ambiente	24
Traço da Calda	3:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2571,9
Massa do PIC com calda	3318,45
Massa do PIC com a restante calda	3187,6
Massa da câmara vazia	2074,4
Massa da câmara preenchida	3127,7
Massa da câmara injectada	3520,3
Massa da tubagem vazia	583,67
Massa da tubagem cheia	623,9
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>392,6</b>
Massa da calda de perdas	307,21
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3162,8
Massa da areia	1053,3
Massa de água a boca	242,18
Massa da calda inicial	746,55
Massa da calda final	24,8
Massa do proveto	1435

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	29
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	39
Tempo [h]	3
Porcentagem (%)	39

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1053,30
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,75</b>
<b>Volume de vazios [cm³]</b>	<b>298,19</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	91
Diâmetro	100



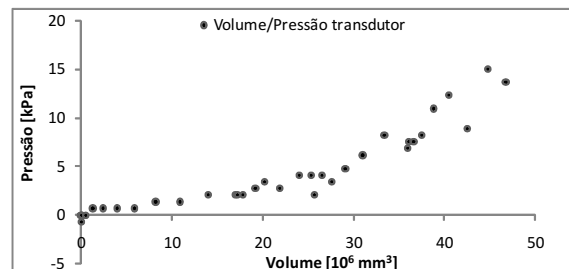
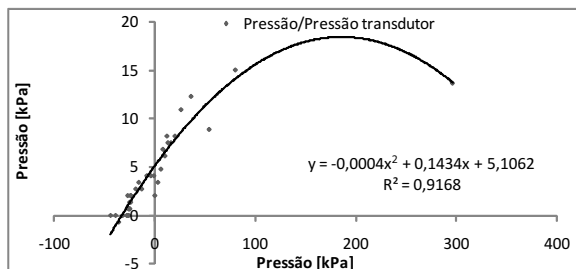
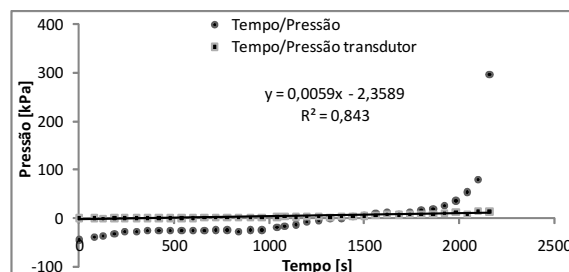
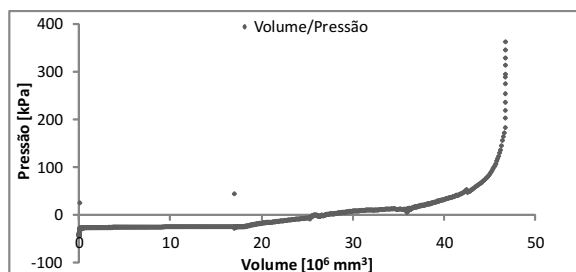
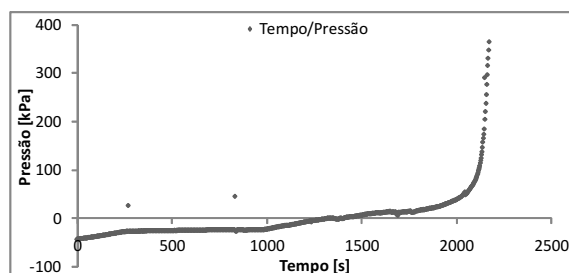
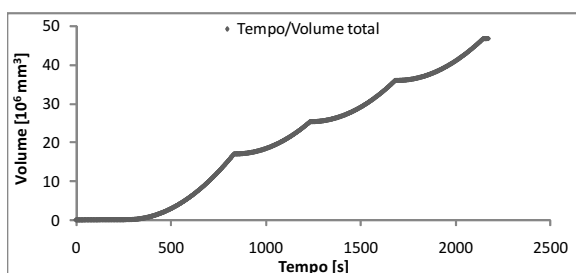
Preparação nº18 Provete nº7	
Data	19-08-2010
Hora	09:30:00
Temperatura ambiente	24
Traço da Calda	3:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2570,8
Massa do PIC com calda	3307,05
Massa do PIC com a restante calda	3198,3
Massa da câmara vazia	2058,4
Massa da câmara preenchida	3105,1
Massa da câmara injectada	3496,8
Massa da tubagem vazia	583,67
Massa da tubagem cheia	618,67
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>391,7</b>
Massa da calda de perdas	283,79
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3165,1
Massa da areia	1046,7
Massa de água a boca	215,59
Massa da calda inicial	736,25
Massa da calda final	33,2
Massa do proveto	1416

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	29
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	30
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	30

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1046,70
Índice de vazios	0,76
Volume de vazios [cm³]	300,68
Porosidade	0,43

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	92
Diâmetro	100



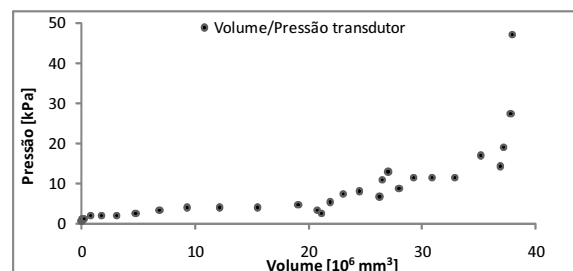
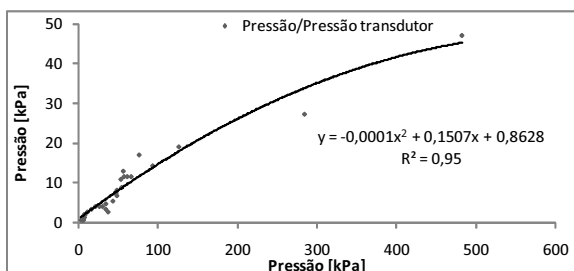
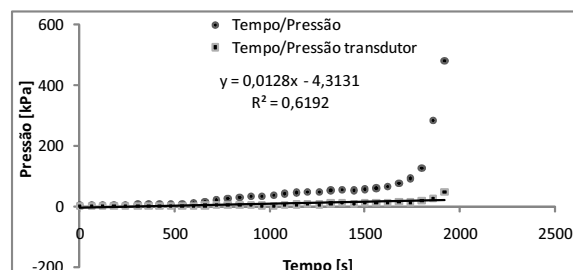
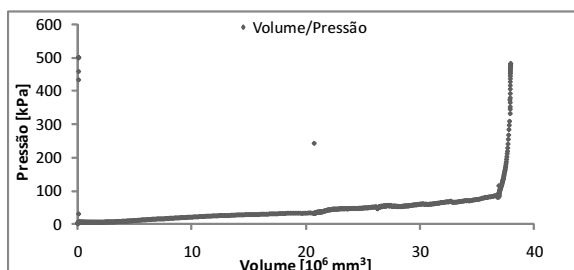
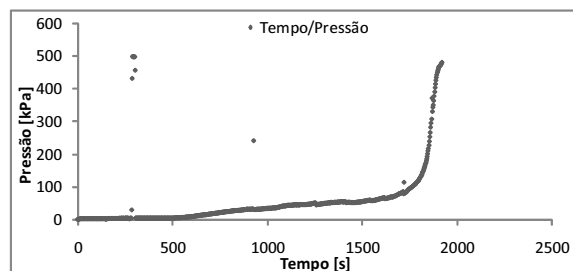
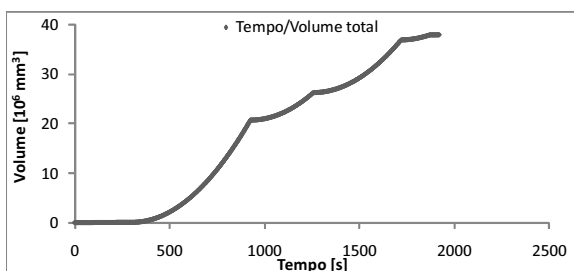
Preparação nº9 Provete nº8	
Data	03-08-2010
Hora	09:30:00
Temperatura ambiente	24
Traço da Calda	3:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2628,3
Massa do PIC com calda	3276,4
Massa do PIC com a restante calda	3182,1
Massa da câmara vazia	2046,6
Massa da câmara preenchida	3093,3
Massa da câmara injectada	3460,9
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	603,04
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>367,6</b>
Massa da calda de perdas	130,61
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3165,2
Massa da areia	1046,7
Massa de água a boca	72,04
Massa da calda inicial	648,1
Massa da calda final	16,9
Massa do proveto	1102

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	28
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	37
Tempo [h]	3
Porcentagem (%)	37

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1046,70
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm³]</b>	<b>300,68</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	79
Dímetro	100



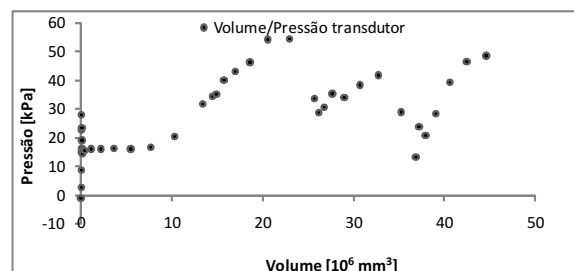
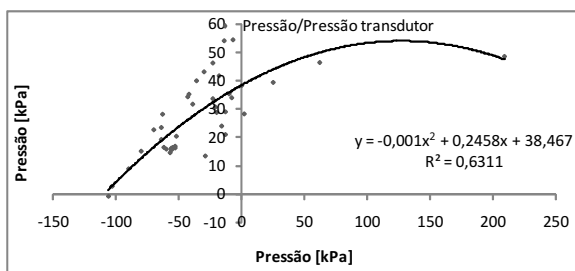
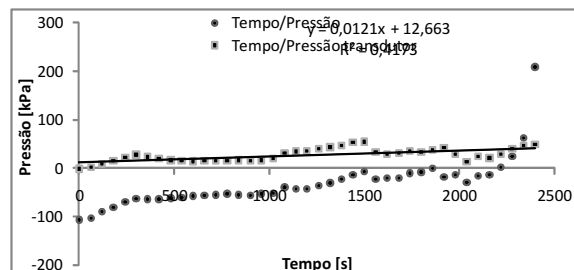
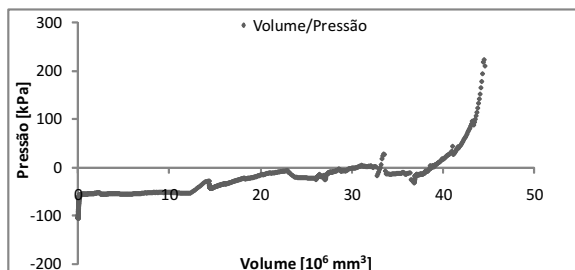
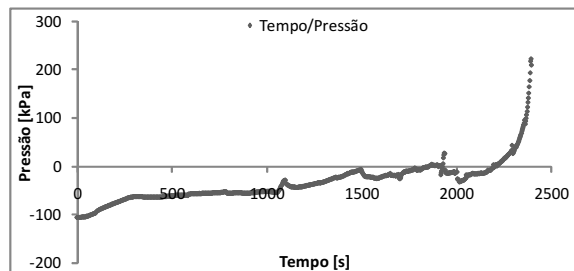
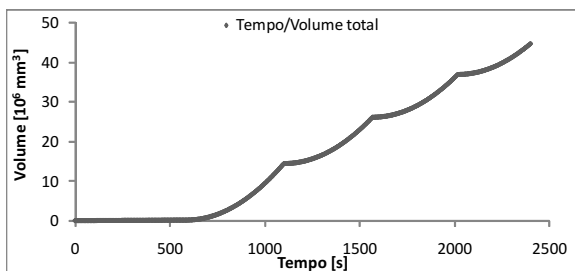
Preparação nº25 Provete nº9	
Data	08-09-2010
Hora	10:00:00
Temperatura ambiente	25
Traço da Calda	3:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2567,4
Massa do PIC com calda	3285,45
Massa do PIC com a restante calda	3186,5
Massa da câmara vazia	2151,6
Massa da câmara preenchida	3085,3
Massa da câmara injectada	3436,5
Massa da tubagem vazia	451,32
Massa da tubagem cheia	493,84
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>351,2</b>
Massa da calda de perdas	363,92
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3160
Massa da areia	933,7
Massa de água a boca	294,9
Massa da calda inicial	718,05
Massa da calda final	26,5
Massa do proveto	1323,84

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	31
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	10
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	10

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	620,35
Massa [g]	933,70
Índice de vazios	0,76
Volume de vazios [cm³]	268,01
Porosidade	0,43

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	89,7
Dímetro	100



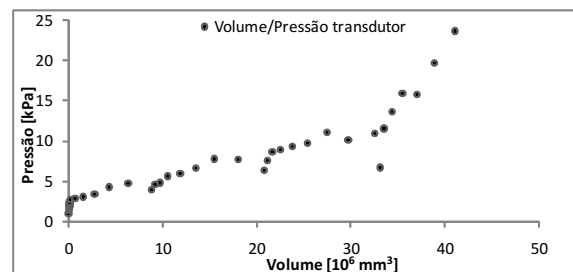
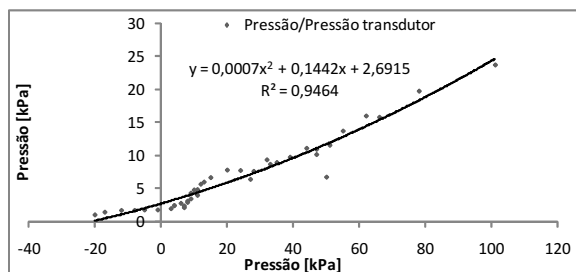
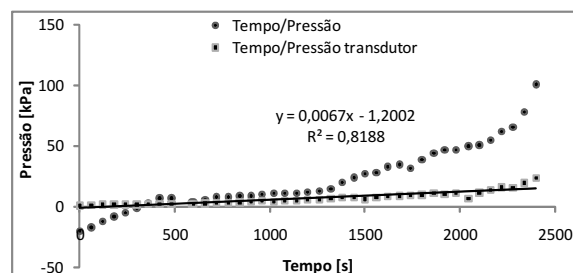
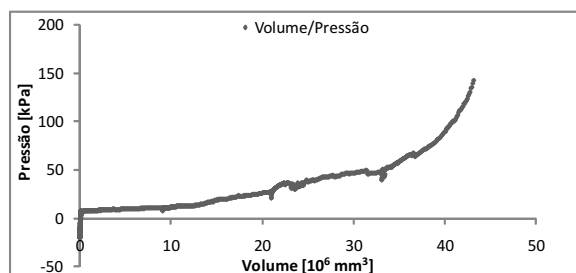
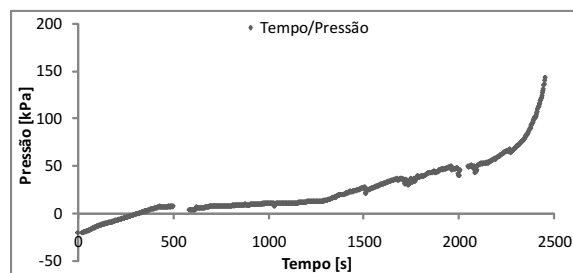
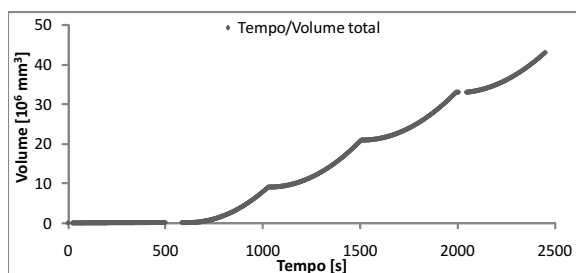
Preparação nº30 Provete nº9	
Data	04-11-2010
Hora	10:30:00
Temperatura ambiente	19
Traço da Calda	3:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2540,2
Massa do PIC com calda	3308,25
Massa do PIC com a restante calda	3182,8
Massa da câmara vazia	2060,1
Massa da câmara preenchida	3106,6
Massa da câmara injectada	3461,4
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	627,05
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>354,8</b>
Massa da calda de perdas	396,74
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3158,2
Massa da areia	1046,5
Massa de água a boca	306,46
Massa da calda inicial	768,05
Massa da calda final	24,6
Massa do proveto	1403,27

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	31
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	9
Tempo [h]	3
Porcentagem (%)	9

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1046,50
Índice de vazios	0,76
Volume de vazios [cm³]	300,75
Porosidade	0,43

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	87,9
Diametro	100,7



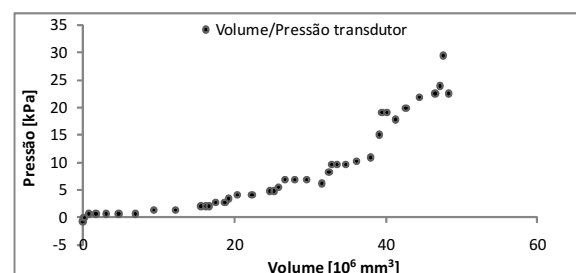
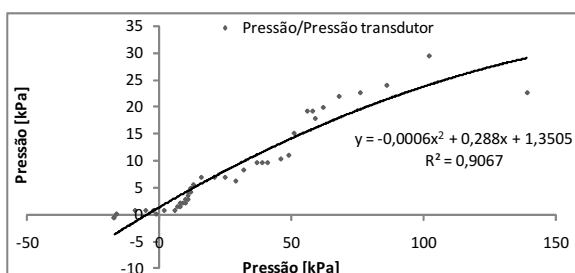
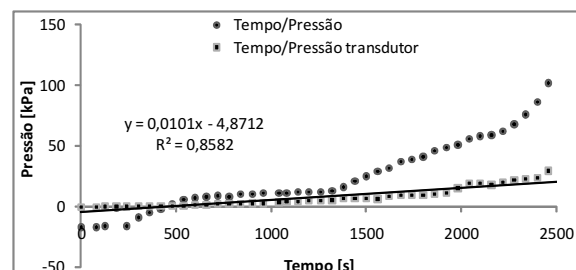
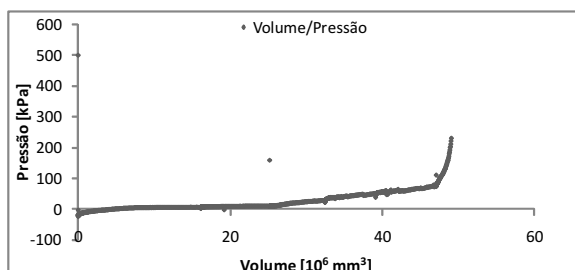
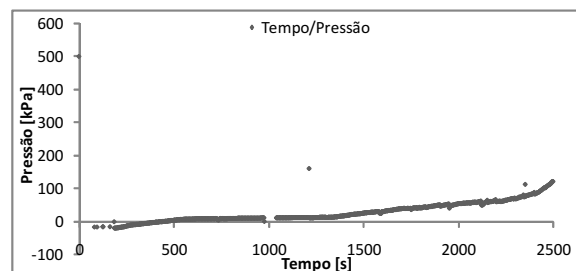
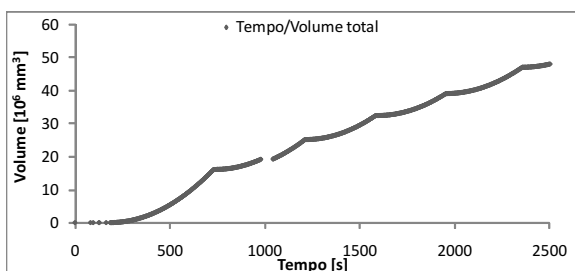
Preparação nº15 Provete nº10	
Data	13-08-2010
Hora	09:30:00
Temperatura ambiente	24
Traço da Calda	3:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2538,5
Massa do PIC com calda	3302,65
Massa do PIC com a restante calda	3181,7
Massa da câmara vazia	2057,7
Massa da câmara preenchida	3104,9
Massa da câmara injectada	3479,9
Massa da tubagem vazia	583,67
Massa da tubagem cheia	624
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>375</b>
Massa da calda de perdas	342,32
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3148,6
Massa da areia	1047,2
Massa de água a boca	268,89
Massa da calda inicial	764,15
Massa da calda final	33,1
Massa do proveto	1254

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	31
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	20
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	20

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1047,20
Índice de vazios	0,76
Volume de vazios [cm³]	300,49
Porosidade	0,43

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	89
Dímetro	100





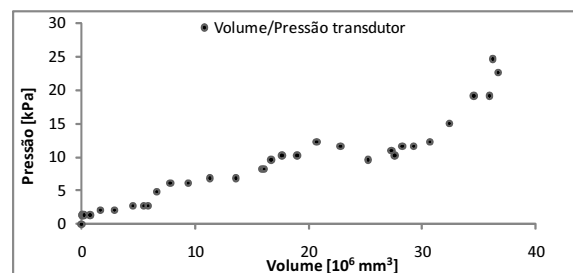
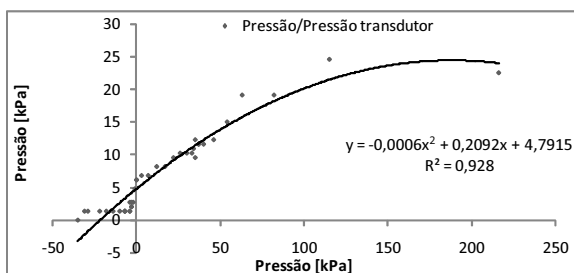
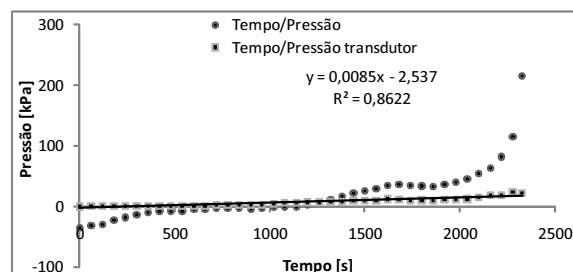
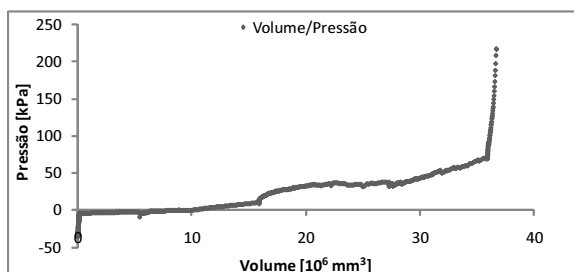
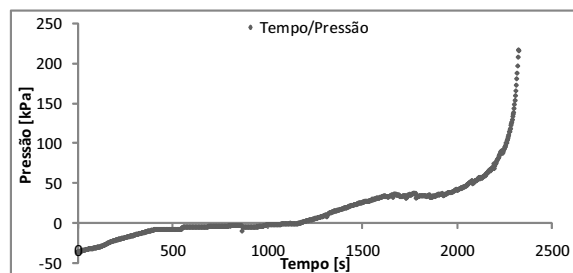
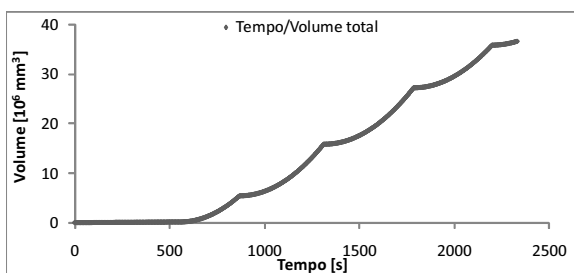
Preparação nº23 Provete nº11	
Data	13-09-2010
Hora	10:30:00
Temperatura ambiente	25
Traço da Calda	4:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2539
Massa do PIC com calda	3294,55
Massa do PIC com a restante calda	3188,9
Massa da câmara vazia	2142,7
Massa da câmara preenchida	3090,5
Massa da câmara injectada	3416,7
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	628,12
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>326,2</b>
Massa da calda de perdas	392,06
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3156,24
Massa da areia	947,8
Massa de água a boca	292,65
Massa da calda inicial	755,55
Massa da calda final	32,66
Massa do proveto	1349,2

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	29
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	52
Tempo [h]	3
Porcentagem (%)	52

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	620,35
Massa [g]	947,80
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,73</b>
<b>Volume de vazios [cm³]</b>	<b>262,69</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,42</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	94
Dímetro	100



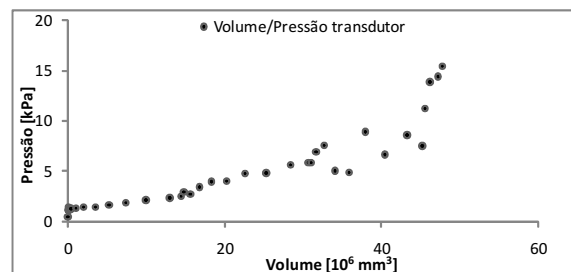
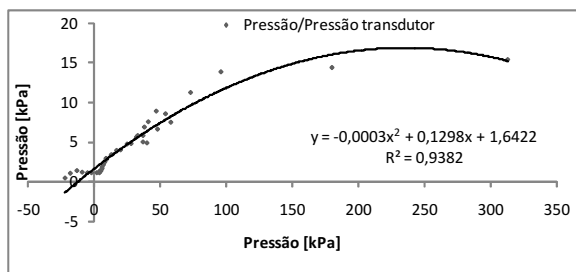
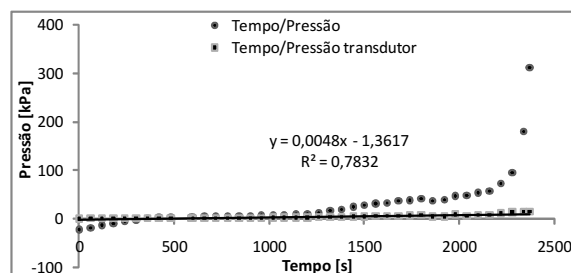
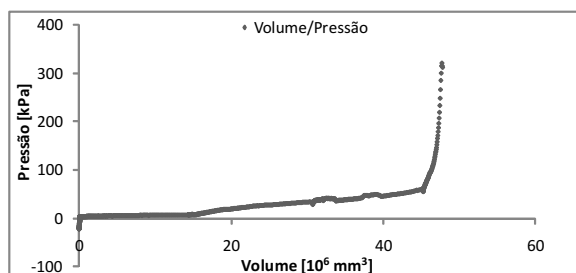
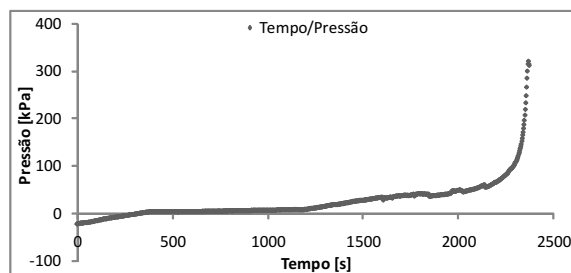
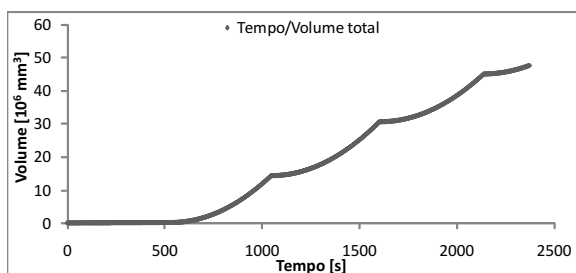
Preparação nº31 Provete nº11	
Data	05-11-2010
Hora	10:30:00
Temperatura ambiente	19
Traço da Calda	4:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2540,5
Massa do PIC com calda	3280,85
Massa do PIC com a restante calda	3185,8
Massa da câmara vazia	2076,4
Massa da câmara preenchida	3122,7
Massa da câmara injectada	3476,6
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	628,67
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>353,9</b>
Massa da calda de perdas	372,78
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3156,1
Massa da areia	1046,3
Massa de água a boca	275,78
Massa da calda inicial	740,35
Massa da calda final	29,7
Massa do proveto	1381,64

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	29
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	48
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	48

Solo	
G	2,65
Volume [cm <sup>3</sup> ]	695,66
Massa [g]	1046,30
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>300,83</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	92,3
Dímetro	99,7



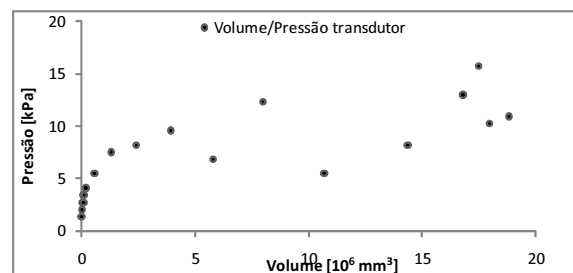
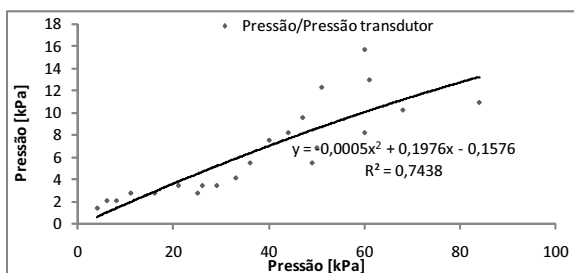
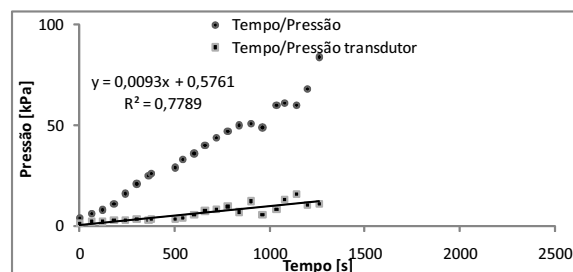
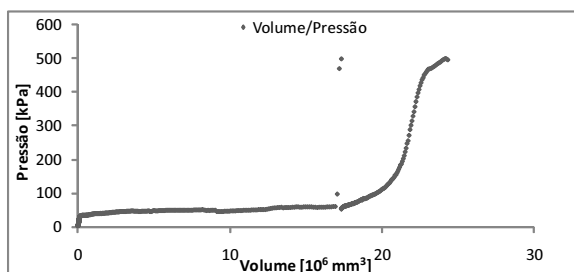
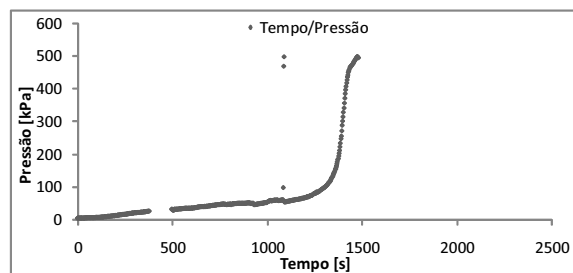
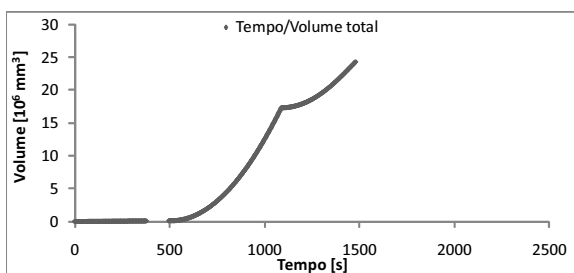
Preparação nº10 Provete nº12	
Data	04-08-2010
Hora	09:30:00
Temperatura ambiente	25
Traço da Calda	4:1:2%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2605,5
Massa do PIC com calda	3260,2
Massa do PIC com a restante calda	3184,3
Massa da câmara vazia	2065
Massa da câmara preenchida	3111,6
Massa da câmara injectada	3453
Massa da tubagem vazia	583,67
Massa da tubagem cheia	626,69
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>341,4</b>
Massa da calda de perdas	329,39
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3148,8
Massa da areia	1046,6
Massa de água a boca	250,87
Massa da calda inicial	654,7
Massa da calda final	35,5
Massa do proveto	938

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	27
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	47
Tempo [h]	3
Porcentagem (%)	47

Solo	
G	2,65
Volume [cm <sup>3</sup> ]	695,66
Massa [g]	1046,60
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>300,71</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	88
Dímetro	98



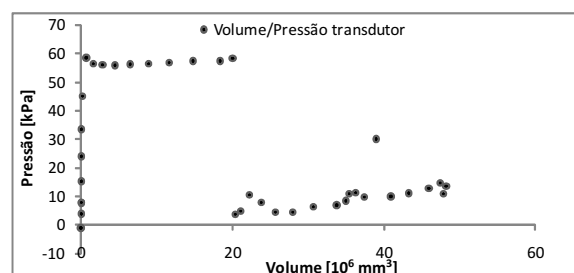
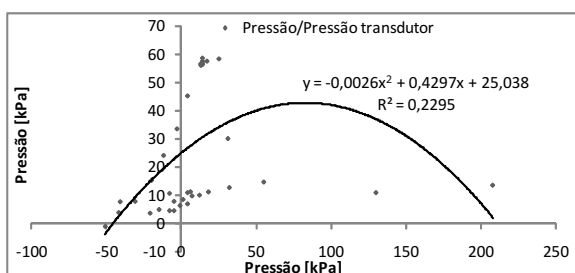
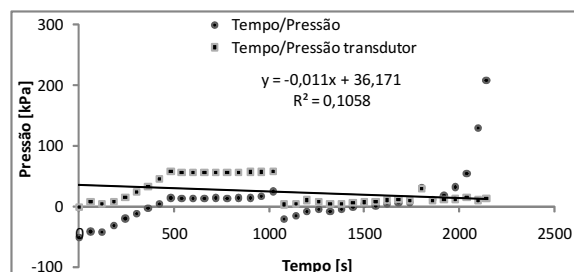
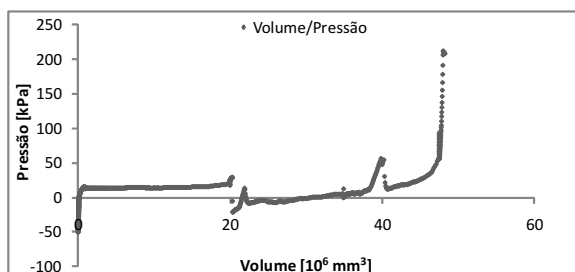
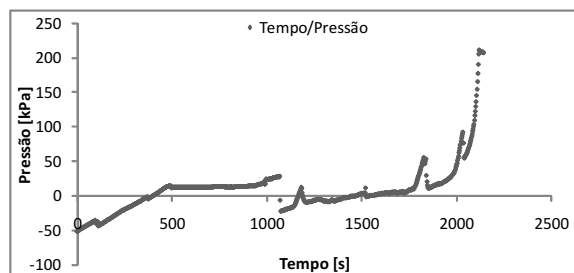
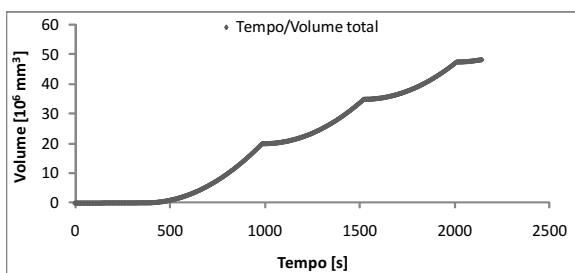
Preparação nº21 Provete nº13	
Data	26-08-2010
Hora	09:30:00
Temperatura ambiente	25
Traço da Calda	4:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2598,4
Massa do PIC com calda	3269,35
Massa do PIC com a restante calda	3180,2
Massa da câmara vazia	2163,7
Massa da câmara preenchida	3102,1
Massa da câmara injectada	3398,9
Massa da tubagem vazia	451,32
Massa da tubagem cheia	490,74
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>296,8</b>
Massa da calda de perdas	323,72
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3162,9
Massa da areia	938,4
Massa de água a boca	267
Massa da calda inicial	670,95
Massa da calda final	17,3
Massa do proveto	1105

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	29
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	38
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	38

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	620,35
Massa [g]	938,40
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,75</b>
<b>Volume de vazios [cm³]</b>	<b>266,24</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	68,15
Dímetro	100



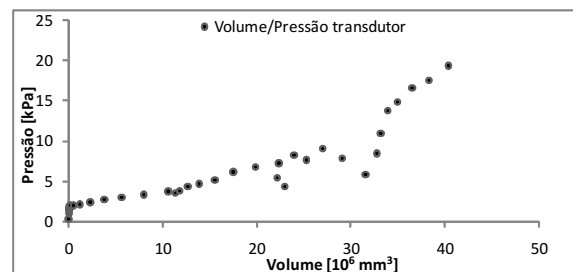
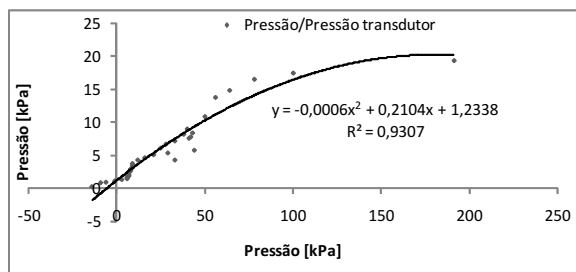
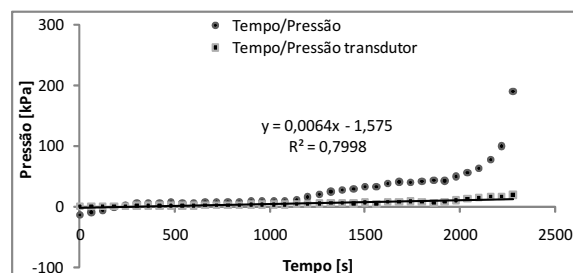
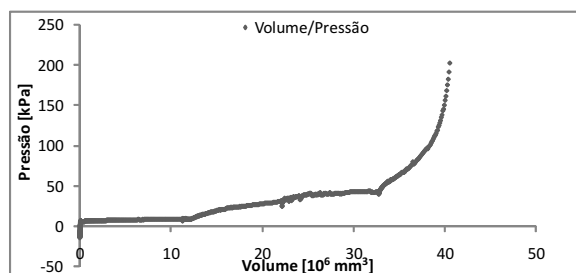
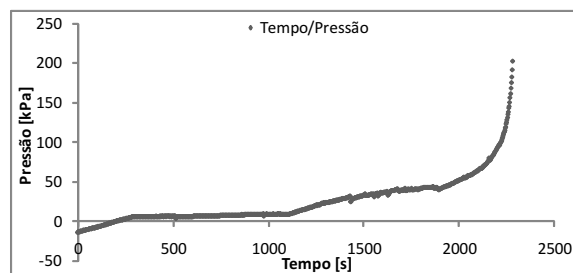
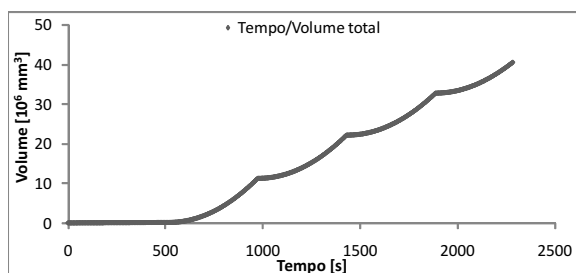
Preparação nº29 Provete nº13	
Data	29-10-2010
Hora	10:30:00
Temperatura ambiente	19
Traço da Calda	4:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2537,1
Massa do PIC com calda	3279,25
Massa do PIC com a restante calda	3181,2
Massa da câmara vazia	2076,9
Massa da câmara preenchida	3123,4
Massa da câmara injectada	3474,7
Massa da tubagem vazia	561,37
Massa da tubagem cheia	625,18
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>351,3</b>
Massa da calda de perdas	365,9
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3159,5
Massa da areia	1046,5
Massa de água a boca	280,39
Massa da calda inicial	742,15
Massa da calda final	21,7
Massa do proveto	1401,68

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	29
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	17
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	17

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1046,50
<b>Índice de vazios</b>	<b>0,76</b>
<b>Volume de vazios [cm³]</b>	<b>300,75</b>
<b>Porosidade</b>	<b>0,43</b>

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	90,3
Dímetro	100,2



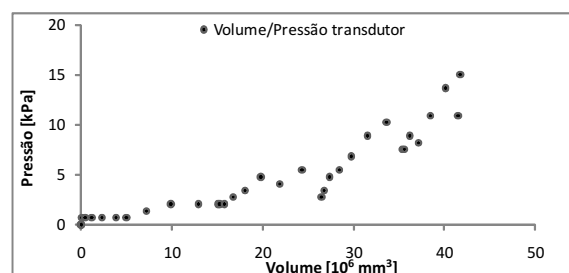
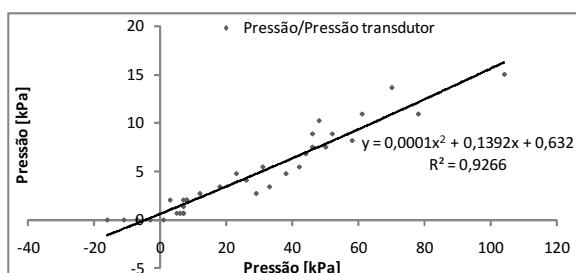
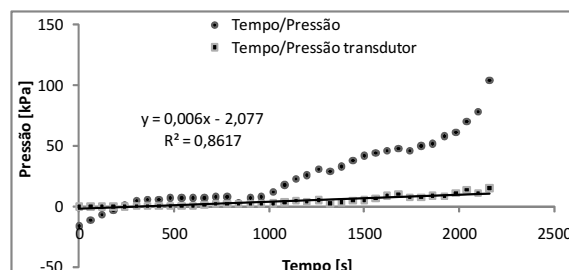
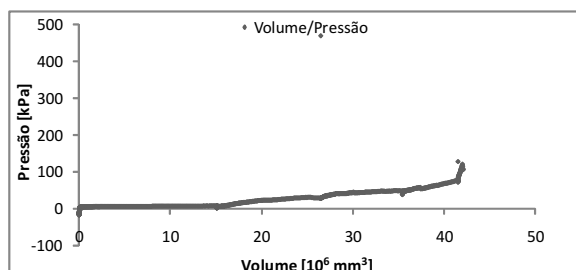
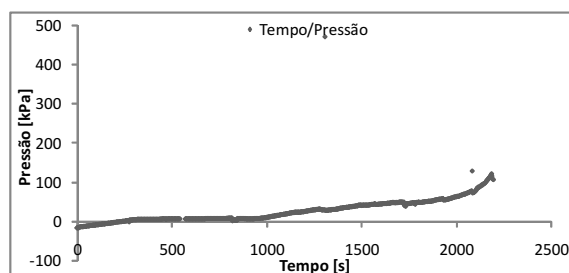
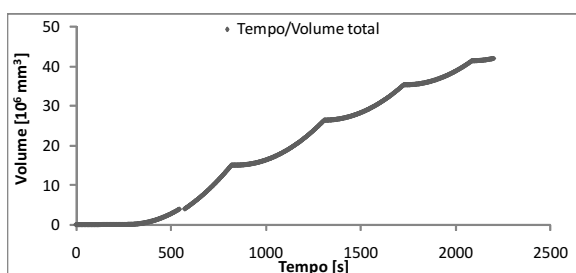
Preparação nº13 Provete nº14	
Data	10-08-2010
Hora	09:30:00
Temperatura ambiente	27
Traço da Calda	4:1:4%
Pressão aplicada [kPa]	73,75

Pesagem [g]	
Massa do PIC vazio	2574,8
Massa do PIC com calda	3269,35
Massa do PIC com a restante calda	3174,4
Massa da câmara vazia	2068,3
Massa da câmara preenchida	3114,7
Massa da câmara injectada	3473,9
Massa da tubagem vazia	583,67
Massa da tubagem cheia	623,2
<b>Massa da calda injectada</b>	<b>359,2</b>
Massa da calda de perdas	281,63
Massa do PIC cheio de água do ensaio	3141,8
Massa da areia	1046,4
Massa de água a boca	209,5
Massa da calda inicial	694,55
Massa da calda final	32,6
Massa do proveto	1273

Ensaio Calda	
Volume Calda [ml]	3000 ml
Cone Marsh	
Tempo [s]	30
Exsudação	
Volume inicial [ml]	100
Volume final [ml]	34
Tempo [h]	3
Percentagem (%)	34

Solo	
G	2,65
Volume [cm³]	695,66
Massa [g]	1046,40
Índice de vazios	0,76
Volume de vazios [cm³]	300,79
Porosidade	0,43

Dimensões do proveto [mm]	
Altura	86
Dímetro	100



## Anexo II

### Permeabilidade

Processo N.º		Amostra N.º	4879	Data	07-07-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º		7/5A			
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100	78,19	
Espessura L (cm)		8			
Altura de Água h (cm)		37,7			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		30			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh		2,558E-03			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*c$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
07-09-2010		300			619,90	2,06633	5,3E-05	Capsula
07-09-2010		352			613,40	1,74261	4,5E-05	Capsula
07-09-2010		418			841,10	2,01220	5,1E-05	Capsula
07-09-2010		724			1437,50	1,98550	5,1E-05	Capsula
07-09-2010		251			503,00	2,00398	5,1E-05	Capsula

Média na cápsula	5,0E-05	m/s
------------------	---------	-----

Processo N.º		Amostra N.º	4878	Data	07-07-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º	7/5A				
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)	100	78,19		
Espessura L (cm)	8				
Altura de Agua h (cm)	37,7				
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	30				
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh	2,558E-03				

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
07-09-2010		344			698,80	2,03140	5,2E-05	Capsula
07-09-2010		562			1097,80	1,95338	5,0E-05	Capsula
07-09-2010		405			761,60	1,88049	4,8E-05	Capsula
07-09-2010		275			505,50	1,83818	4,7E-05	Capsula
07-09-2010		492			882,40	1,79350	4,6E-05	Capsula

Média na cápsula	4,9E-05	m/s
------------------	---------	-----



Processo N.º		Amostra N.º	11-15	Data	06-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Constante					
Aparelho N.º					
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)		100	77,91	
Espessura L (cm)			5		
Altura de Água h (cm)			150		
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)			35		
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$			4,289E-04		

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
06-09-2010	60	3600		15,44	15,44	0,00429	1,8E-08	Cápsula
06-09-2010	3 15	11700		15,44 16,58	1,14	0,00010	4,2E-10	Cápsula
06-09-2010	20	1200		16,58 16,58	0,00	0,00000	0,0E+00	Cápsula
06-09-2010	1 20	4800	-16434 -16811	16,58 17,28	0,70	0,00015	6,3E-10	Cápsula
			377		0,38	0,00008	3,4E-10	Controlador
06-09-2010	60	3600	-16811 -17107	17,28 17,77	0,49	0,00014	5,8E-10	Cápsula
			296		0,30	0,00008	3,5E-10	Controlador
06-09-2010	55	3300	-17107 -17202	17,77 17,77	0,00	0,00000	0,0E+00	Cápsula
			95		0,10	0,00003	1,2E-10	Controlador
07-09-2010	16 10	58200	-17202 -21805	17,77 21,74	3,97	0,00007	2,9E-10	Cápsula
			4603		4,60	0,00008	3,4E-10	Controlador
07-09-2010	3 50	13800	-21805 -22924	21,74 23,04	1,30	0,00009	4,0E-10	Cápsula
			1119		1,12	0,00008	3,5E-10	Controlador

Média na cápsula	3,0E-09	m/s
Média no controlador	3,0E-10	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	14-16	Data	02-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º			7/5A		
Secção da Amostra S (cm²)			f (mm)	100	78,54
Espessura L (cm)			6		
Altura de Água h (cm)			100		
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)			30		
Area do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$			7,665E-04		

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
02-09-2010	20	1200	-20185	21,6	2,10	0,00175	1,3E-08	Capsula
			-22059	23,7				
			1874		1,87	0,00156	1,2E-08	Controlador
02-09-2010	20	1200	-22375	21,6	2,03	0,00169	1,3E-08	Capsula
			-24247	23,63				
			1872		1,87	0,00156	1,2E-08	Controlador
02-09-2010	25	1500	-24498	21,6	2,43	0,00162	1,2E-08	Capsula
			-26803	24,03				
			2305		2,31	0,00154	1,2E-08	Controlador
02-09-2010	5	300	-29046	21,6	0,58	0,00193	1,5E-08	Capsula
			-29495	22,18				
			449		0,45	0,00150	1,1E-08	Controlador
02-09-2010	10	600	-29735	21,6	1,00	0,00167	1,3E-08	Capsula
			-30613	22,6				
			878		0,88	0,00146	1,1E-08	Controlador

Média na cápsula	1,3E-08	m/s
Média no controlador	1,2E-08	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	17-17	Data	15-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º			V1		
Secção da Amostra S (cm²)			f (mm)	100	71,18
Espessura L (cm)			4		
Altura de Água h (cm)			100		
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)			30		
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh			4,945E-04		

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
15-09-2010	30	1800	39944	22,77	1,61	0,00089	4,4E-09	Capsula
			38473	24,38				
			1471		1,47	0,00082	4,0E-09	Controlador
15-09-2010	15	900	38372	24,38	0,95	0,00106	5,2E-09	Capsula
			37541	25,33				
			831		0,83	0,00092	4,6E-09	Controlador
15-09-2010	10	600	37408	25,33	0,62	0,00103	5,1E-09	Capsula
			36895	25,95				
			513		0,51	0,00086	4,2E-09	Controlador
15-09-2010	5	300	36797	25,95	0,45	0,00150	7,4E-09	Capsula
			36354	26,4				
			443		0,44	0,00148	7,3E-09	Controlador
15-09-2010	3	10800	36238	26,4	9,67	0,00090	4,4E-09	Capsula
			27294	36,07				
			8944		8,94	0,00083	4,1E-09	Controlador

Média na cápsula	5,3E-09	m/s
Média no controlador	4,8E-09	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	22-18	Data	06-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º			IV		
Secção da Amostra S (cm²)			f (mm)	100	78,54
Espessura L (cm)			4		
Altura de Água h (cm)			100		
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)			30		
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh			5,093E-04		

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
06-09-2010	3	12300		22,25	2,36	0,00019	9,8E-10	Cápsula
	25			24,61				
								Controlador
06-09-2010	1	5100	66917	24,61	1,47	0,00029	1,5E-09	Cápsula
	25		66195	26,08				
			722		0,72	0,00014	7,2E-10	Controlador
06-09-2010	60	3600	66195	26,08	0,00	0,00000	0,0E+00	Cápsula
			65587	26,08				
			608		0,61	0,00017	8,6E-10	Controlador
06-09-2010	55	3300	65587	26,08	0,00	0,00000	0,0E+00	Cápsula
			65288	26,08				
			299		0,30	0,00009	4,6E-10	Controlador
06-09-2010	16	57900	65288	26,08	7,58	0,00013	6,7E-10	Cápsula
	5		59933	33,66				
			5355		5,36	0,00009	4,7E-10	Controlador
06-09-2010	35	2100	59933	33,66	0,00	0,00000	0,0E+00	Cápsula
			59862	33,66				
			71		0,07	0,00003	1,7E-10	Controlador
07-09-2010	3	12300	59862	33,66	-0,01	0,00000		Cápsula
	25		58996	33,65				
			866		0,87	0,00007	3,6E-10	Controlador

Média na cápsula	5,2E-10	m/s
Média no controlador	5,1E-10	m/s

Processo N.º	Amsotra N.º	24-19	Data	15-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante				
Aparelho N.º	20776			
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)	100	70,58	
Espessura L (cm)	3			
Altura de Água h (cm)	100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	30			
Área do Tubo a (cm²)				
Constante $c=L/Sh$	3,967E-04			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
15-09-2010	20	1200	-50309	22,77	17,20	0,01433	5,7E-08	Capsula
			-68670	39,97				
			18361		18,36	0,01530	6,1E-08	Controlador
15-09-2010	10	600	-70907	22,77	8,20	0,01367	5,4E-08	Capsula
			-80108	30,97				
			9201		9,20	0,01534	6,1E-08	Controlador
15-09-2010	15	900	-81598	22,77	12,68	0,01409	5,6E-08	Capsula
			-95362	35,45				
			13764		13,76	0,01529	6,1E-08	Controlador
15-09-2010	5	300	-97169	22,77	3,65	0,01217	4,8E-08	Capsula
			-101750	26,42				
			4581		4,58	0,01527	6,1E-08	Controlador
15-09-2010	10	600	-29966	22,77	8,54	0,01423	5,6E-08	Capsula
			-39152	31,31				
			9186		9,19	0,01531	6,1E-08	Controlador

Média na cápsula	5,4E-08	m/s
Média no controlador	6,1E-08	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	27-20	Data	20-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Constante					
Aparelho N.º	7A				
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)		99		76,98
Espessura L (cm)	6				
Altura de Água h (cm)	100				
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	30				
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$	7,405E-04				

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
20-09-2010	10	600	-6337	21,73	9,03	0,01505	1,1E-07	Capsula
			-15482	30,76				
			9145		9,15	0,01524	1,1E-07	Controlador
20-09-2010	10	600	-17979	21,75	9,06	0,01510	1,1E-07	Capsula
			-27102	30,81				
			9123		9,12	0,01521	1,1E-07	Controlador
20-09-2010	10	600	-28350	30,81	9,10	0,01517	1,1E-07	Capsula
			-37483	39,91				
			9133		9,13	0,01522	1,1E-07	Controlador
20-09-2010	5	300	-39270	39,91	4,97	0,01657	1,2E-07	Capsula
			-44319	44,88				
			5049		5,05	0,01683	1,2E-07	Controlador

Média na cápsula	1,1E-07	m/s
Média no controlador	1,2E-07	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	8-1	Data	11-10-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Constante					
Aparelho N.º	V1				
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)		100		78,54
Espessura L (cm)	10				
Altura de Água h (cm)	200				
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	30				
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$	6,112E-04				

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
11-10-2010	20	1200	14580					
			14920					
			340		0,34	0,00028	1,7E-09	Controlador
11-10-2010	30	1800	14580					
			15010					
			430		0,43	0,00024	1,5E-09	Controlador
11-10-2010	38	2280	14580					
			15020					
			440		0,44	0,00019	1,2E-09	Controlador
11-10-2010	184	11040	14580					
			16480					
			1900		1,90	0,00017	1,1E-09	Controlador

Média na cápsula	0,0E+00	m/s
Média no controlador	1,4E-09	m/s

Processo N.º	Amsotra N.º	20-3	Data	24-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante				
Aparelho N.º	29N			
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)	100	78,54	
Espessura L (cm)	9			
Altura de Água h (cm)	100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	30			
Área do Tubo a (cm²)				
Constante c=L/Sh	1,168E-03			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
24-09-2010	28	1710	15490					
			14570					
			920		0,92	0,00054	6,3E-09	Controlador
24-09-2010	32	1920	15610					
			14570					
			1040		1,04	0,00054	6,3E-09	Controlador
24-09-2010	44	2640	15810					
			14570					
			1240		1,24	0,00047	5,5E-09	Controlador

Média na cápsula	0,0E+00	m/s
Média no controlador	6,0E-09	m/s

Processo N.º	Amsotra N.º	26-5	Data	22-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante				
Aparelho N.º	22076			
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)	100	78,54	
Espessura L (cm)	9			
Altura de Água h (cm)	100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	30			
Área do Tubo a (cm²)				
Constante c=L/Sh	1,155E-03			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
22-09-2010	3	180	38912	21,75	2,54	0,01411	1,6E-07	Capsula
			36396	24,29				
			2516		2,52	0,01398	1,6E-07	Controlador
22-09-2010	5	300	33706	24,29	4,35	0,01450	1,7E-07	Capsula
			29240	28,64				
			4466		4,47	0,01489	1,7E-07	Controlador
22-09-2010	5	300	27315	28,64	4,68	0,01560	1,8E-07	Capsula
			22737	33,32				
			4578		4,58	0,01526	1,8E-07	Controlador
22-09-2010	5	300	21130	33,32	4,51	0,01503	1,7E-07	Capsula
			16551	37,83				
			4579		4,58	0,01526	1,8E-07	Controlador

Média na cápsula	1,7E-07	m/s
Média no controlador	1,7E-07	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	25-9	Data	22-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º			V1		
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100	78,54	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		30			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$		1,142E-03			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
22-09-2010	3	180	-44162	21,98	2,74	0,01522	1,7E-07	Capsula
			-46919	24,72				
			2757		2,76	0,01532	1,7E-07	Controlador
22-09-2010	5	300	-49619	24,72	4,57	0,01523	1,7E-07	Capsula
			-54180	29,29				
			4561		4,56	0,01520	1,7E-07	Controlador
22-09-2010	5	300	-56248	29,29	4,52	0,01507	1,7E-07	Capsula
			-60831	33,81				
			4583		4,58	0,01528	1,7E-07	Controlador
22-09-2010	5	300	-62452	33,81	4,54	0,01513	1,7E-07	Capsula
			-67053	38,35				
			4601		4,60	0,01534	1,8E-07	Controlador

Média na cápsula	1,7E-07	m/s
Média no controlador	1,7E-07	m/s



Processo N.º		Amsotra N.º	23-11	Data	24-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º		28N			
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100	69,39	
Espessura L (cm)		10			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		30			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$		1,451E-03			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
24-09-2010	28	1710	27000					
			14710					
			12290		12,29	0,00719	1,0E-07	Controlador
24-09-2010	32	1920	27230					
			14710					
			12520		12,52	0,00652	9,5E-08	Controlador
24-09-2010	44	2640	30010					
			14710					
			15300		15,30	0,00580	8,4E-08	Controlador

Média na cápsula	0,0E+00	m/s
Média no controlador	9,4E-08	m/s

Processo N.º		Amsotra N.º	21-13	Data	02-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º			6/6A		
Secção da Amostra S (cm²)			f (mm)	100	78,54
Espessura L (cm)			7		
Altura de Água h (cm)			100		
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)			30		
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh			8,683E-04		

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
02-09-2010	20	1200	-2718	21,31				
			-8594	32,2	10,89	0,00908	7,88E-08	Capsula
								Controlador
02-09-2010	20	1200	-10547	21,31				
			-22567	33,45	12,14	0,01012	8,78E-08	Capsula
			12020		12,02	0,01002	8,70E-08	Controlador
02-09-2010	25	1500	-23985	21,31				
			-40409	37,71	16,40	0,01093	9,49E-08	Capsula
			16424		16,42	0,01095	9,51E-08	Controlador
02-09-2010	5	300	-55121	21,31				
			-58699	26	4,69	0,01563	1,36E-07	Capsula
			3578		3,58	0,01193	1,04E-07	Controlador
02-09-2010	10	600	-60660	21,31				
			-67420	28,89	7,58	0,01263	1,10E-07	Capsula
			6760		6,76	0,01127	9,78E-08	Controlador

Média na cápsula	1,0E-07	m/s
Média no controlador	9,6E-08	m/s

Processo N.º	Amsotra N.º	32-1	Data	22-11-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante				
Aparelho N.º	IV-22077			
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)	100,6	79,48	
Espessura L (cm)	9			
Altura de Água h (cm)	500			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	70			
Área do Tubo a (cm²)				
Constante c=L/Sh	2,271E-04			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm²)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
22-11-2010	31	1864		0	12,91	0,00693	1,6E-08	Cápsula
				12,91				
22-11-2010	58	3480		0	21,51	0,00618	1,4E-08	Cápsula
				21,51				
22-11-2010	36	2162		0	12,28	0,00568	1,3E-08	Cápsula
				12,28				

Média na cápsula	1,4E-08	m/s
Média no controlador	0,0E+00	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	33-3	Data	22-11-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º		6A			
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100,43	79,21	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		500			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		70			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh		2.276E-04			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm²)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
22-11-2010	31	1864		0	9,63	0,00517	1,2E-08	Cápsula
				9,63				
22-11-2010	58	3480		0	16,89	0,00485	1,1E-08	Cápsula
				16,89				
22-11-2010	36	2162		0	9,85	0,00456	1,0E-08	Cápsula
				9,85				

Média na cápsula	1,1E-08	m/s
Média no controlador	0,0E+00	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	28-5	Data	10-11-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º					
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100,8	79,76	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		500			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		70			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh		2,288E-04			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
10-11-2010	10	600		11,4	1,93	0,00322	7,4E-09	Cápsula
				9,47				
10-11-2010	10	600		20,4	1,90	0,00317	7,2E-09	Cápsula
				18,5				
10-11-2010	10	600		11,5	2,03	0,00338	7,7E-09	Cápsula
				9,47				

Média na cápsula	7,4E-09	m/s
Média no controlador	0,0E+00	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	30-9	Data	20-12-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Constante					
Aparelho N.º			7-5A		
Secção da Amostra S (cm²)			f (mm)	100,8	79,8
Espessura L (cm)			9		
Altura de Água h (cm)			500		
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)			70		
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh			2,206E-04		

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
20-12-2010	2	145	-15680		6,21	0,04277	9,4E-08	Controlador
			-21890					
			6210					
20-12-2010	5	272	-17560		8,09	0,02976	6,6E-08	Controlador
			-25650					
			8090					
20-12-2010	4	227	-16180		6,71	0,02956	6,5E-08	Controlador
			-22890					
			6710					
20-12-2010	4	248	-16930		7,46	0,03007	6,6E-08	Controlador
			-24390					
			7460					
20-12-2010	4	221	-16020		6,55	0,02966	6,5E-08	Controlador
			-22570					
			6550					

Média na cápsula	0,0E+00	m/s
Média no controlador	7,1E-08	m/s

Processo N.º	Amsotra N.º	29-13	Data	10-11-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante				
Aparelho N.º				
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)	100,2	78,81	
Espessura L (cm)	9			
Altura de Água h (cm)	500			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	70			
Área do Tubo a (cm²)				
Constante c=L/Sh	2,292E-04			

Ensaio								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³)	Leituras com cápsulas (b) (g)	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A * C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
10-11-2010	10	600		18,94	9,61	0,01602	3,7E-08	Cápsula
				9,33				
10-11-2010	10	600		28,51	9,73	0,01622	3,7E-08	Cápsula
				18,78				
10-11-2010	10	600		18,39	9,06	0,01510	3,5E-08	Cápsula
				9,33				

Média na cápsula	3,6E-08	m/s
Média no controlador	0,0E+00	m/s

## Permeabilidade após a saturação

Processo N.º		Amostra N.º	8-1	Data	27-10-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Constante					
Aparelho N.º			29N		
Secção da Amostra S (cm²)			f (mm)	100	78,54
Espessura L (cm)			9		
Altura de Água h (cm)			100		
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)			270		
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$			1,168E-03		

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
27-10-2010	5	300	0	0				
			53	303				
			53	303	0,18	0,00059	6,9E-09	Controlador
27-10-2010	5	300	53	303				
			82	382				
			29	79	0,05	0,00018	2,1E-09	Controlador
27-10-2010	5	300	82	382				
			108	448				
			26	66	0,05	0,00015	1,8E-09	Controlador
27-10-2010	15	900	108	448				
			201	596				
			93	148	0,12	0,00013	1,6E-09	Controlador
27-10-2010	31	1860	201	596				
			385	845				
			184	249	0,25	0,00013	1,6E-09	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	2,8E-09	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	20-3	Data	12-10-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º	29N				
Secção da Amostra S (cm²)	f (mm)	100	78,54		
Espessura L (cm)	9				
Altura de Água h (cm)	100				
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)	270				
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$	1,168E-03				

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
12-10-2010	5	300	19560	69038				
			19814	69364				
			254	326	0,29	0,00097	1,1E-08	Controlador
12-10-2010	5	300	19814	69364				
			20071	69685				
			257	321	0,29	0,00096	1,1E-08	Controlador
12-10-2010	5	300	20071	69685				
			20327	69980				
			256	295	0,28	0,00092	1,1E-08	Controlador
12-10-2010	15	900	20327	69980				
			21099	70849				
			772	869	0,82	0,00091	1,1E-08	Controlador
12-10-2010	31	1860	21099	70849				
			22490	72351				
			1391	1502	1,50	0,00081	9,4E-09	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	1,1E-08	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	26-5	Data	30-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Constante					
Aparelho N.º		22076			
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100	78,54	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		270			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$		1,155E-03			

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
30-09-2010	3	180	0	0				
			606	875				
			606	875	0,74	0,00411	4,8E-08	Controlador
30-09-2010	2	120	606	875				
			874	1205				
			268	330	0,30	0,00249	2,9E-08	Controlador
30-09-2010	5	300	874	1205				
			1594	1908				
			720	703	0,71	0,00237	2,7E-08	Controlador
30-09-2010	5	300	1594	1908				
			2669	3081				
			1075	1173	1,12	0,00375	4,3E-08	Controlador
30-09-2010	15	900	2669	3081				
			5848	6326				
			3179	3245	3,21	0,00357	4,1E-08	Controlador
30-09-2010	30	1800	5848	6326				
			12234	12615				
			6386	6289	6,34	0,00352	4,1E-08	Controlador

Média na cápsula	0,0E+00	m/s
Média no controlador	3,7E-08	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	25-9	Data	30-09-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º		V1			
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100	78,54	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		270			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$		1,142E-03			

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
			0	0	V=b			
30-09-2010	4	255	3421	4040				
			3421	4040	3,73	0,01463	1,7E-07	Controlador
30-09-2010	2	120	3421	4040				
			5168	5800				
			1747	1760	1,75	0,01461	1,7E-07	Controlador
30-09-2010	4	240	5168	5800				
			9087	9400				
			3919	3600	3,76	0,01566	1,8E-07	Controlador
30-09-2010	5	300	9087	9400				
			14521	14000				
			5434	4600	5,02	0,01672	1,9E-07	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	1,8E-07	m/s



Processo N.º		Amostra N.º	23-11	Data	08-10-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º		6A			
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100	69,39	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		270			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante c=L/Sh		1,293E-03			

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
08-10-2010	5	300	923	800				
			944	1084				
08-10-2010	5	300	21	284	0,15	0,00051	6,6E-09	Controlador
			944	1084				
			1014	1180				
08-10-2010	5	300	70	96	0,08	0,00028	3,6E-09	Controlador
			1014	1180				
			1036	1207				
08-10-2010	15	900	22	27	0,02	0,00008	1,1E-09	Controlador
			1036	1207				
			1115	1290				
08-10-2010	31	1860	79	83	0,08	0,00009	1,2E-09	Controlador
			1115	1290				
			1203	1414				
			88	124	0,12	0,00007	8,6E-10	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	2,6E-09	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	32-1	Data	30-11-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º					
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100,6	79,48	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		270			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$		1,135E-03			

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
30-11-2010	5	300	3625	0				
			3813	559				
			188	559	0,37	0,00125	1,4E-08	Controlador
30-11-2010	5	300	3813	559				
			3963	736				
			150	177	0,16	0,00055	6,2E-09	Controlador
30-11-2010	5	300	3963	736				
			4136	871				
			173	135	0,15	0,00051	5,8E-09	Controlador
30-11-2010	15	900	4136	871				
			4527	1246				
			391	375	0,38	0,00043	4,8E-09	Controlador
30-11-2010	30	1800	4527	1246				
			5162	1810				
			635	564	0,56	0,00031	3,6E-09	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	6,9E-09	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	33-3	Data	30-11-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º					
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100,43	79,21	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		270			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$		1,138E-03			

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
30-11-2010	5	300	1749	0				
			1870	247				
30-11-2010	5	300	121	247	0,18	0,00061	7,0E-09	Controlador
			1870	247				
30-11-2010	5	300	1967	404				
			97	157	0,13	0,00042	4,8E-09	Controlador
30-11-2010	5	300	1967	404				
			2093	556				
30-11-2010	15	900	126	152	0,14	0,00046	5,3E-09	Controlador
			2093	556				
30-11-2010	30	1800	2466	954				
			373	398	0,39	0,00043	4,9E-09	Controlador
30-11-2010	30	1800	2466	954				
			3207	1769				
			741	815	0,82	0,00045	5,2E-09	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	5,4E-09	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	28-5	Data	22-11-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º					
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100,8	79,76	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		270			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$		1,144E-03			

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
22-11-2010	5	300	1	4				
			207	520				
			206	516	0,36	0,00120	1,4E-08	Controlador
22-11-2010	5	300	207	520				
			414	783				
			207	263	0,24	0,00078	9,0E-09	Controlador
22-11-2010	5	300	414	783				
			619	1007				
			205	224	0,21	0,00072	8,2E-09	Controlador
22-11-2010	15	900	619	1007				
			1242	1686				
			623	679	0,65	0,00072	8,3E-09	Controlador
22-11-2010	30	1800	1242	1686				
			2465	2943				
			1223	1257	1,26	0,00070	8,0E-09	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	9,4E-09	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	30-9	Data	04-01-2011
Ensaio de Permeabilidade - Carga Constante					
Aparelho N.º			7-5A		
Secção da Amostra S (cm²)			f (mm)	100,8	79,8
Espessura L (cm)			9		
Altura de Água h (cm)			100		
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)			270		
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$			1,103E-03		

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	$V=a*b$ (cm³)	$A=V/t$ (cm³/s)	$K=A*C$ (m/s)	Obsr.
					$V=b$			
04-01-2011	5	300	3625	0				
			3813	559				
			188	559	0,37	0,00125	1,4E-08	Controlador
04-01-2011	5	300	3813	559				
			3963	736				
			150	177	0,16	0,00055	6,0E-09	Controlador
04-01-2011	5	300	3963	736				
			4136	871				
			173	135	0,15	0,00051	5,7E-09	Controlador
04-01-2011	15	900	4136	871				
			4527	1246				
			391	375	0,38	0,00043	4,7E-09	Controlador
04-01-2011	30	1800	4527	1246				
			5162	1810				
			635	564	0,56	0,00031	3,5E-09	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	6,7E-09	m/s

Processo N.º		Amostra N.º	29-13	Data	22-11-2010
Ensaio de Permeabilidade - Carga Cosntante					
Aparelho N.º					
Secção da Amostra S (cm²)		f (mm)	100,2	78,81	
Espessura L (cm)		9			
Altura de Água h (cm)		100			
Tensão Aplicada $\sigma$ (kPa)		270			
Área do Tubo a (cm²)					
Constante $c=L/Sh$		1,146E-03			

Ensaio Média								
Dia	Hora (min.)	t (s)	Leituras com Controlador (mm³) entrada	Leituras com Controlador (mm³) saída	V=a*b (cm³)	A=V/t (cm³/s)	K=A*C (m/s)	Obsr.
					V=b			
22-11-2010	5	300	0	5				
			1652	1906				
			1652	1901	1,78	0,00592	6,8E-08	Controlador
22-11-2010	5	300	1652	1906				
			3352	3606				
			1700	1700	1,70	0,00567	6,5E-08	Controlador
22-11-2010	5	300	3352	3606				
			5095	5311				
			1743	1705	1,72	0,00575	6,6E-08	Controlador
22-11-2010	15	900	5095	5311				
			10158	10403				
			5063	5092	5,08	0,00564	6,5E-08	Controlador
22-11-2010	30	1800	10158	10403				
			20334	20411				
			10176	10008	10,01	0,00556	6,4E-08	Controlador

Média na cápsula		m/s
Média no controlador	6,5E-08	m/s

## Anexo III

### Compressão Diametral

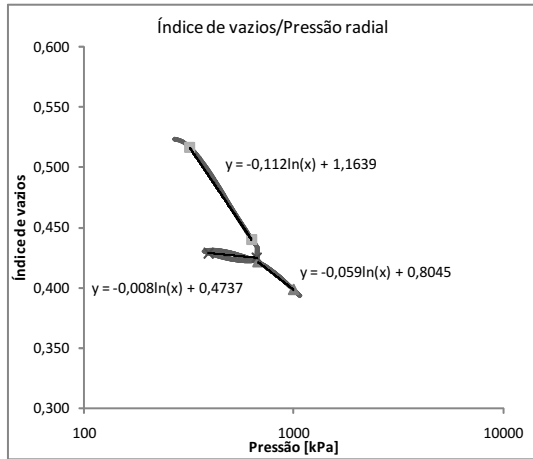
Identificação do provete	Data		Idade (dias)	Massa (g)	Dimensões do provete (m)		Força de rotura F (kN)	Tensão de rotura fct (kPa)
	Fabrico	Ensaio			Diâmetro, d	Comprimento, L		
19-6	20-08-2010	27-08-2010	7	1435	0,100	0,091	1,55	108
9-8	03-08-2010	31-08-2010	28	1102	0,100	0,079	1,82	146
10-12	04-08-2010	01-09-2010	28	938	0,098	0,088	0,22	16
18-7	19-08-2010	02-09-2010	14	1416	0,100	0,092	2,49	172
12-4	09-08-2010	06-09-2010	28	1377	0,100	0,092	3,45	240
13-14	10-08-2010	07-09-2010	28	1273	0,100	0,086	0,74	55
15-10	13-08-2010	10-09-2019	28	1254	0,100	0,089	2,34	167
16-2	16-08-2010	13-09-2010	28	1414	0,100	0,095	5,46	368





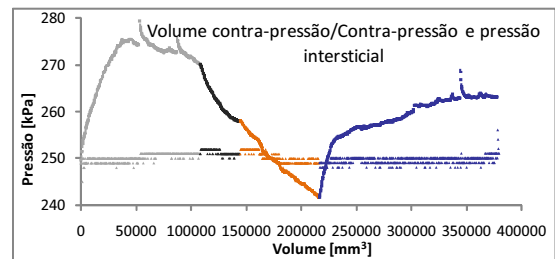
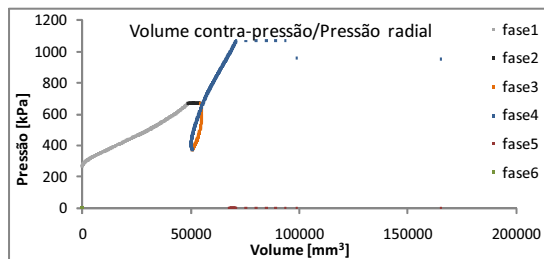
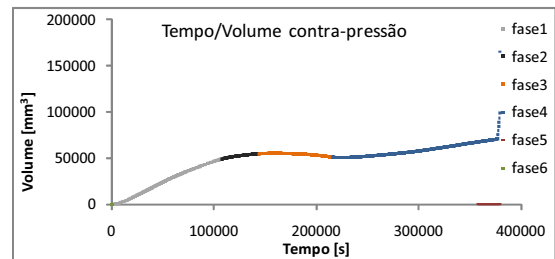
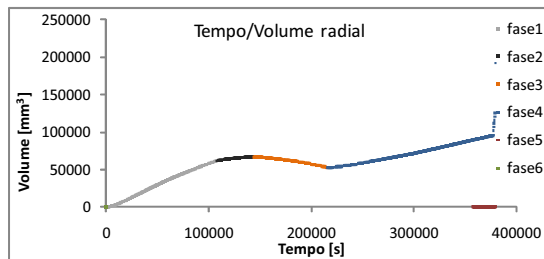
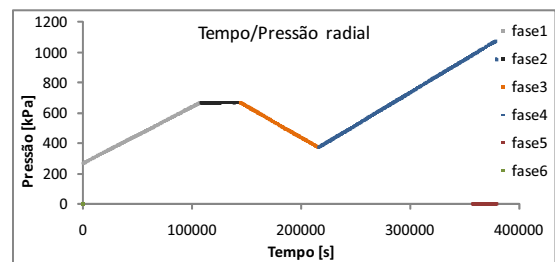
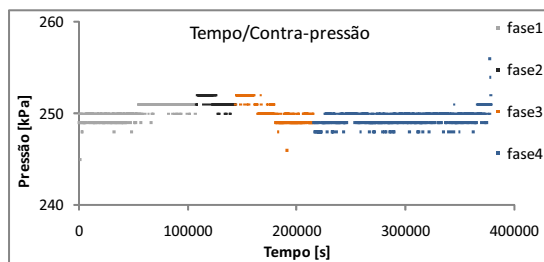
## Anexo IV

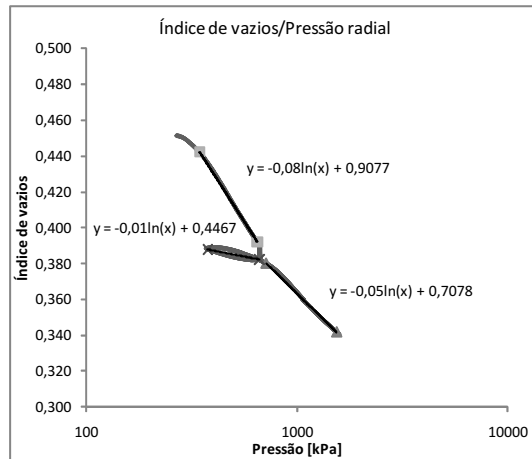
### Fichas de ensaio da compressão isotrópica



Provede 8-1						
Provede molhado (g)	Provede seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	efinal	n	
1482,57	1196,03	286,54	753,98	0,380	0,275	

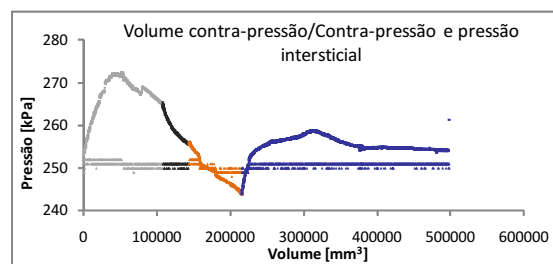
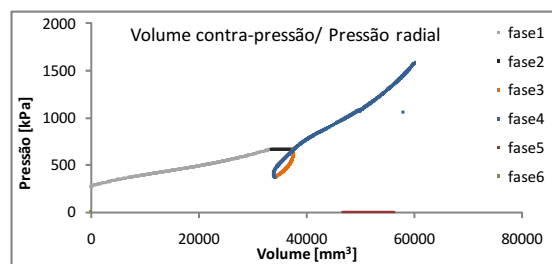
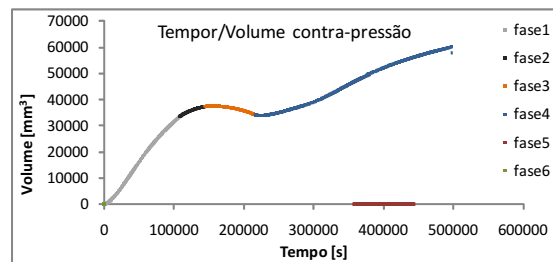
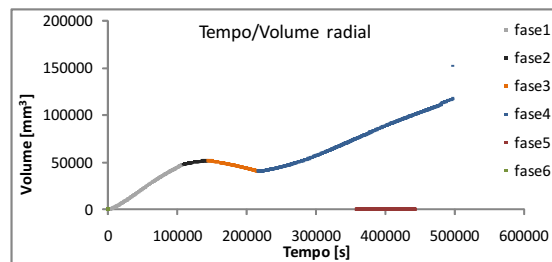
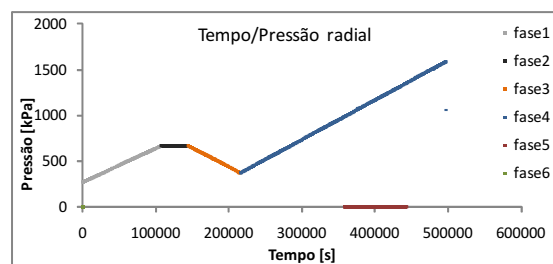
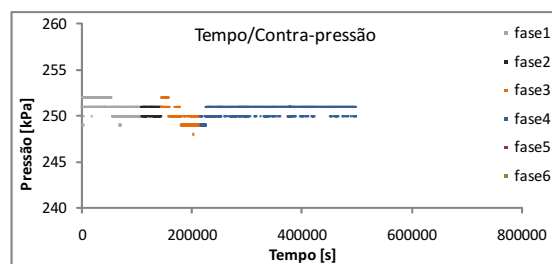
Provede 8-1						
$\lambda_1$	K1	$\lambda_2$	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,112	-0,008	-0,059	-	14,00	-	0,52

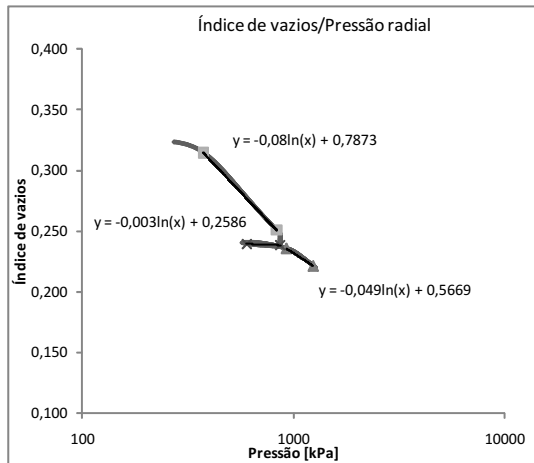




Provete 20-3					
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	e final	n
1423,69	1185,89	237,8	720,21	0,330	0,248

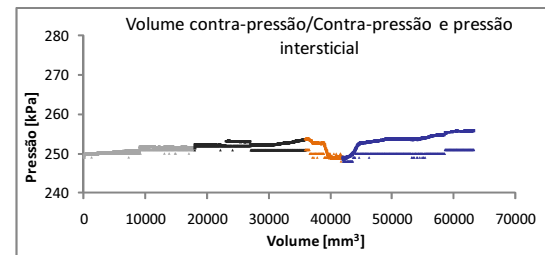
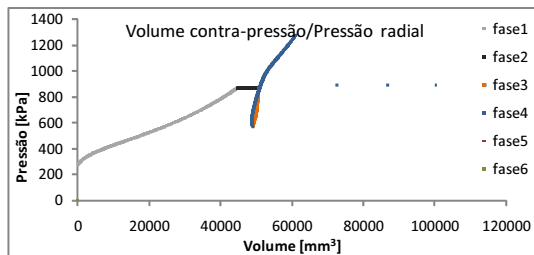
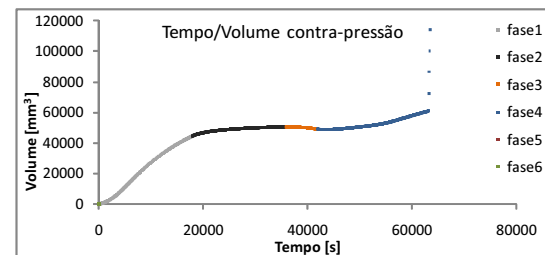
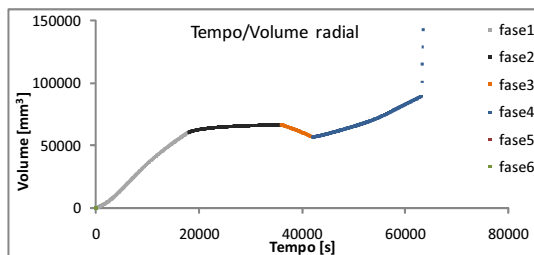
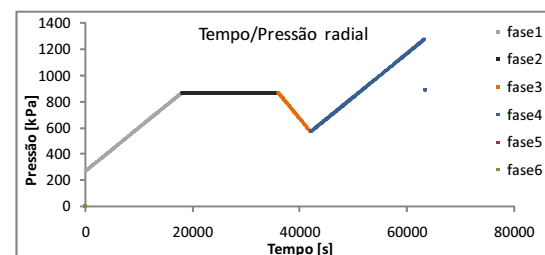
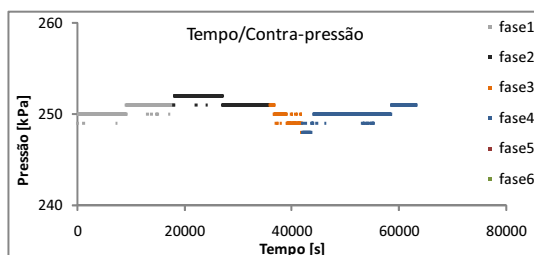
Provete 20-3						
A1	K1	A2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,08	-0,01	-0,05	-	8,00	-	0,45

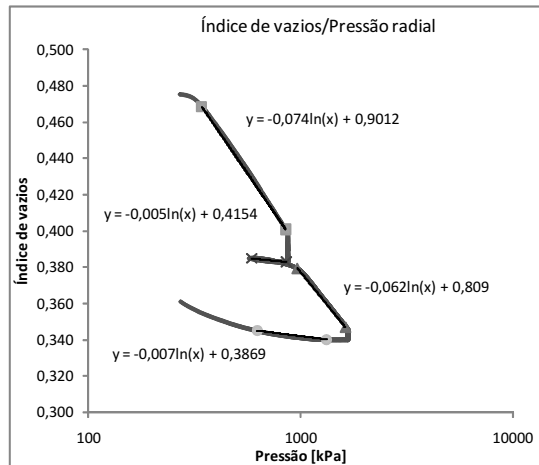




Provete 26-5					
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	e final	n
956,68	807,13	149,55	712,36	0,210	0,174

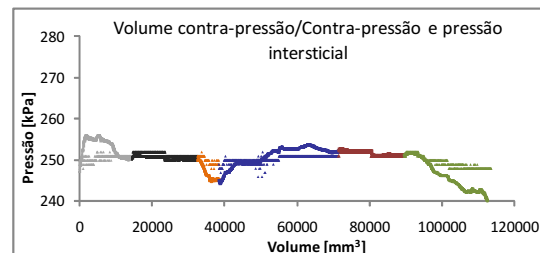
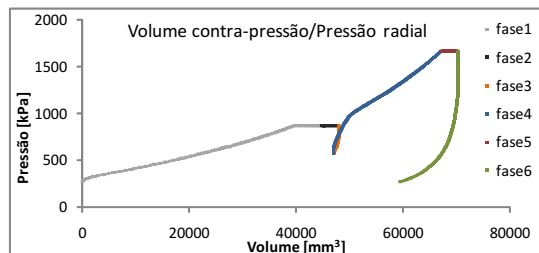
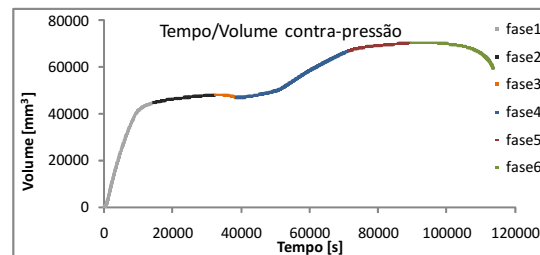
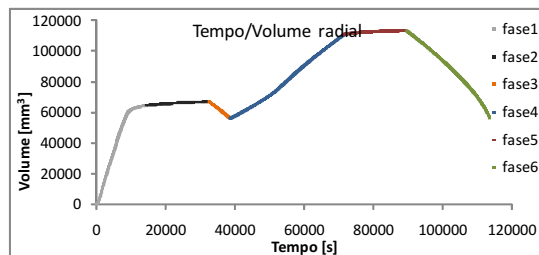
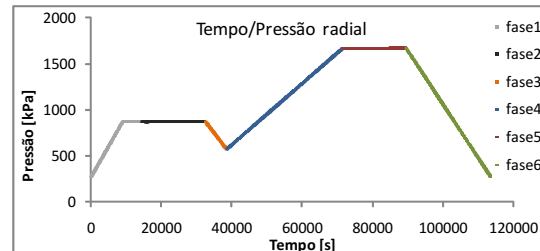
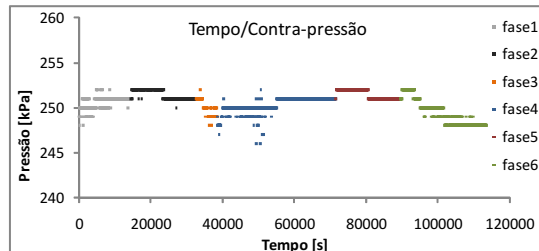
Provete 26-5						
A1	K1	A2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,08	-0,003	-0,049	-	26,67	-	0,32

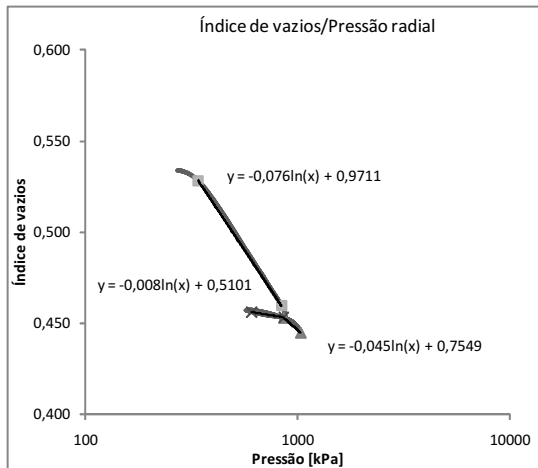




Provete 25-09					
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	e final	n
1349,88	1102,82	247,06	704,50	0,351	0,260

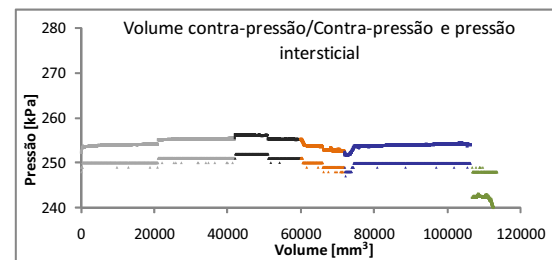
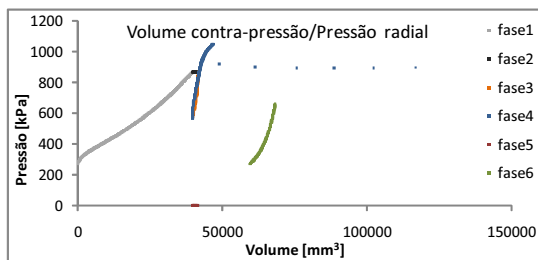
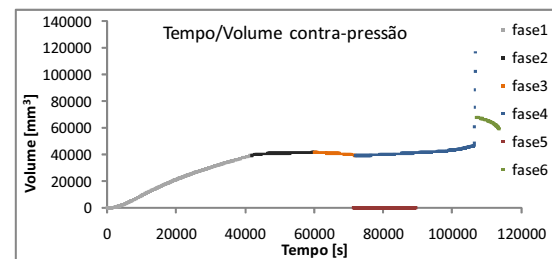
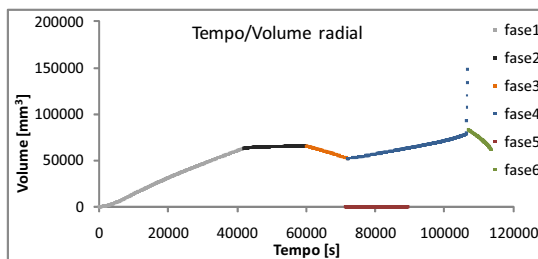
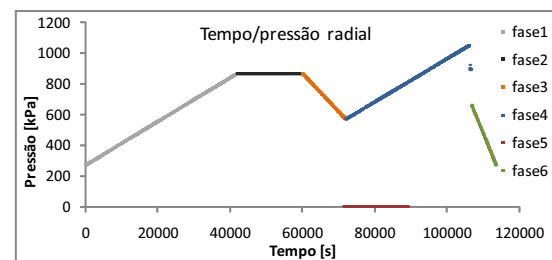
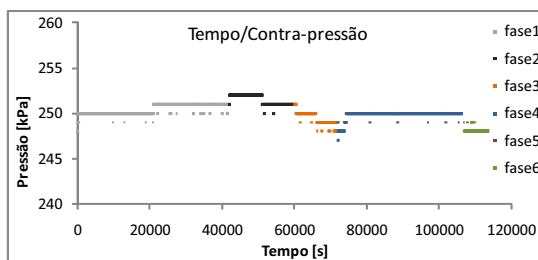
Provete 25-09						
A1	K1	A2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,074	-0,005	-0,062	-0,007	14,80	8,86	0,48

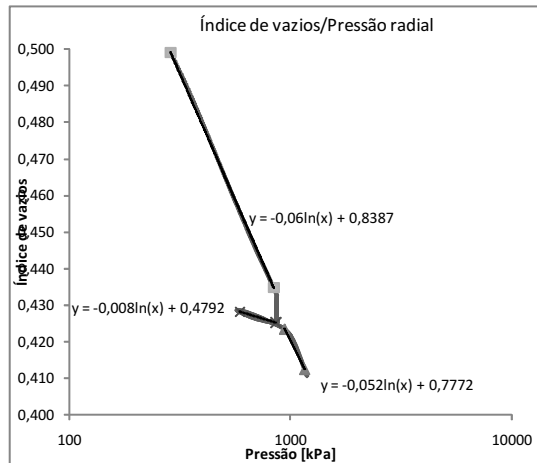




Provete 23-11					
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	e final	n
1438,66	1116,04	322,62	738,27	0,437	0,304

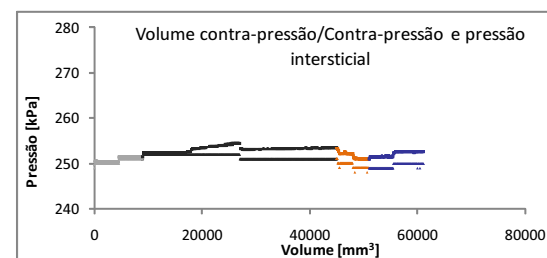
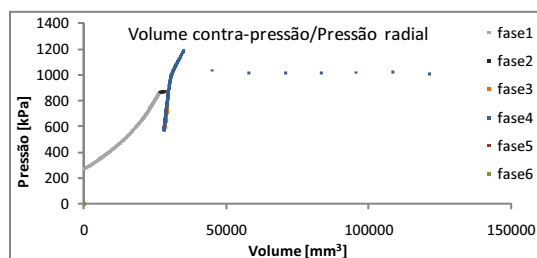
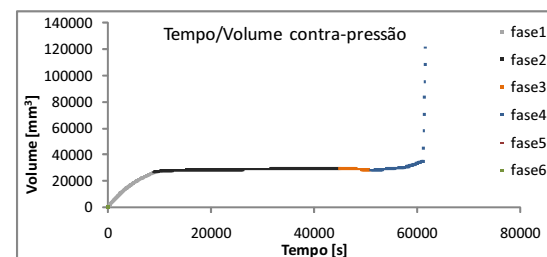
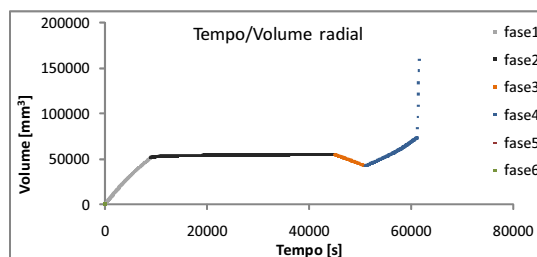
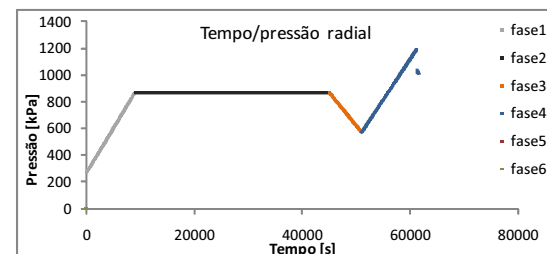
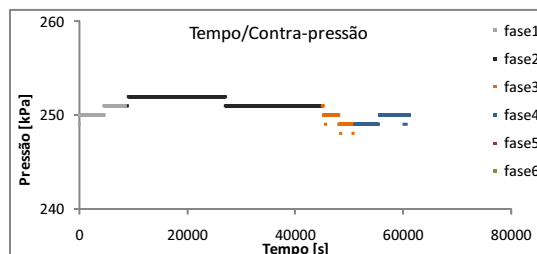
Provete 23-11						
A1	K1	A2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,076	-0,008	-0,045	-	9,50	-	0,53

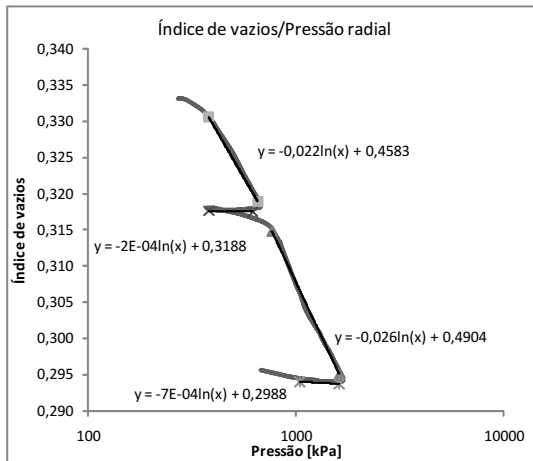




Provete 21-13					
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	e final	n
1125,54	909,16	216,38	535,25	0,404	0,288

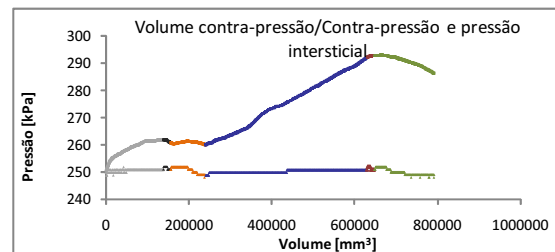
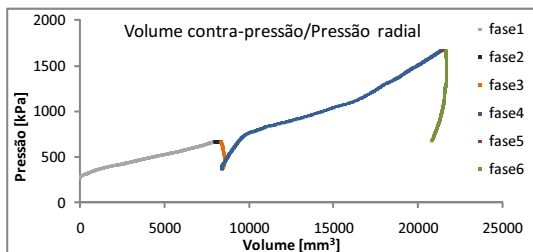
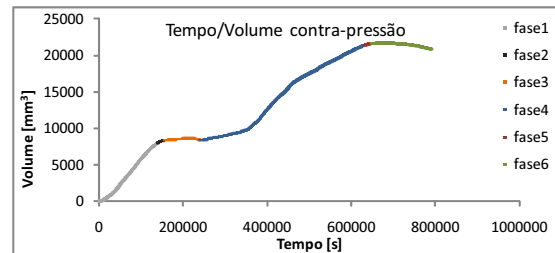
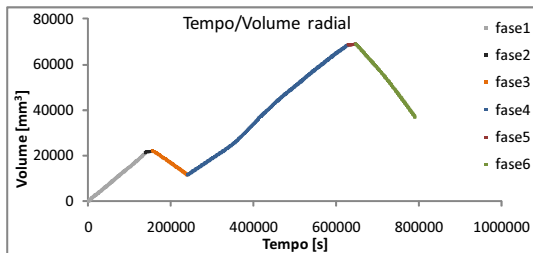
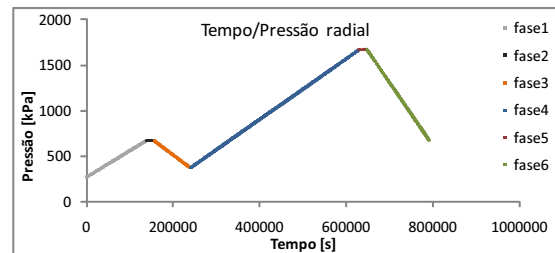
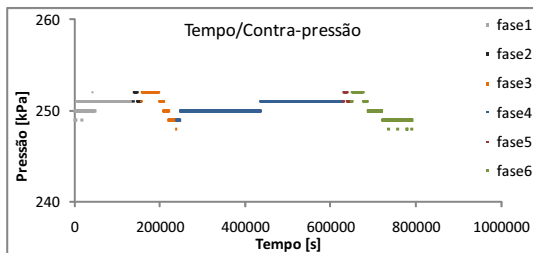
Provete 21-13						
A1	K1	A2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,06	-0,008	-0,052	-	7,50	-	0,50

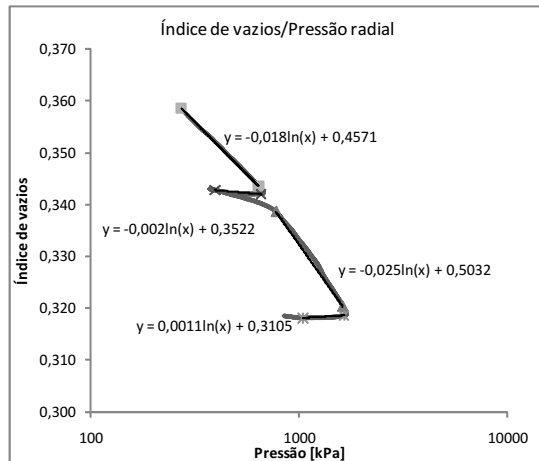




Provete 32-01					
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	e	n
1487,02	1276,43	210,59	716,96	0,294	0,227

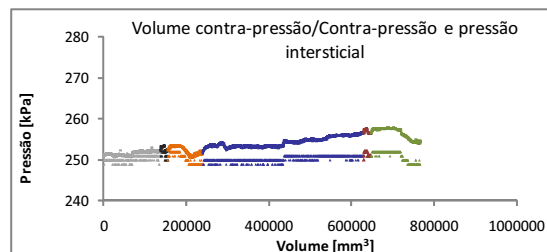
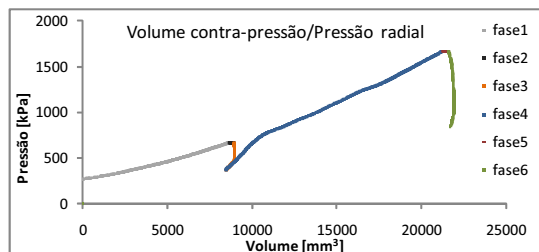
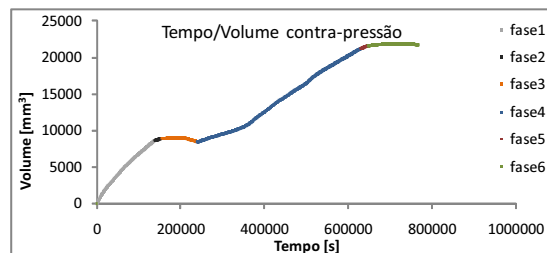
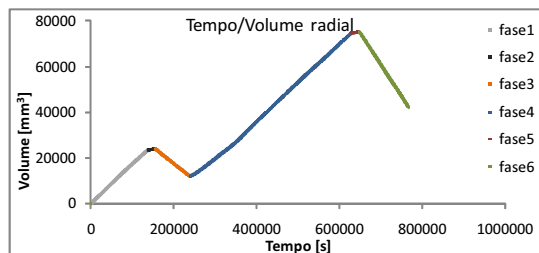
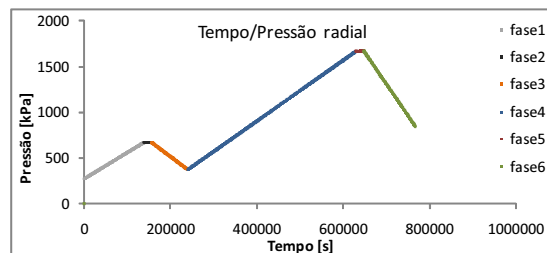
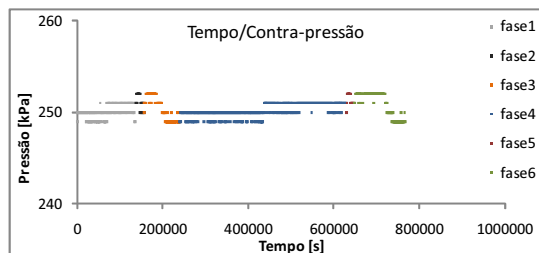
Provete 32-01						
A1	K1	A2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,022	-0,0002	-0,026	-0,0007	110,00	37,14	0,3331



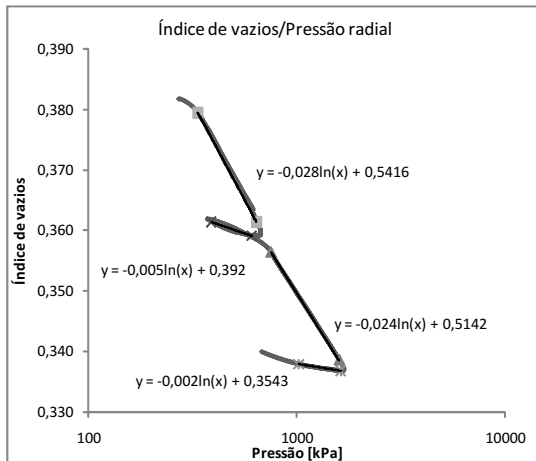


Provete 33-03						
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	e	n	
1482,12	1255,83	226,29	713,32	0,317	0,241	

Provete 33-03						
λ1	K1	λ2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,018	-0,002	-0,025	0,0011	9,00	-22,73	0,3586

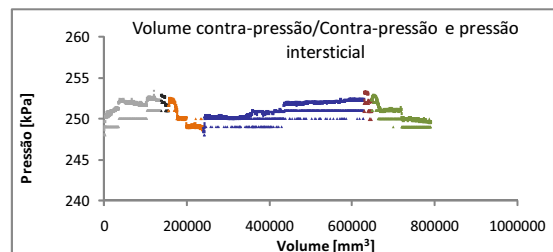
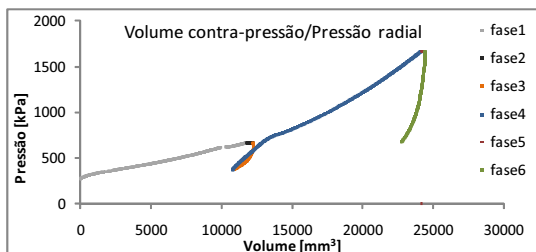
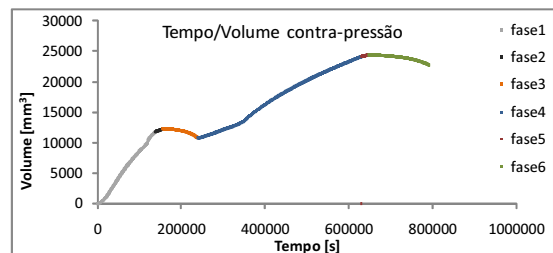
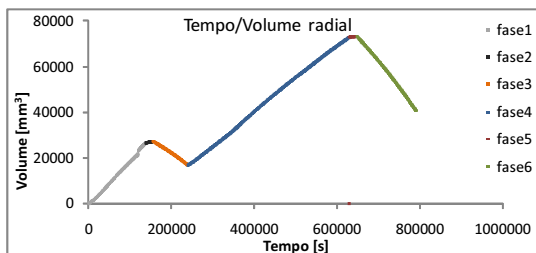
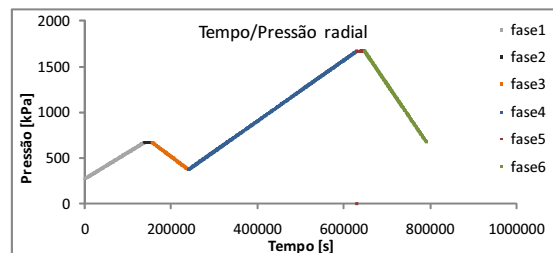
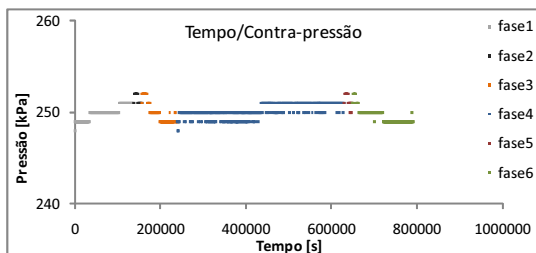


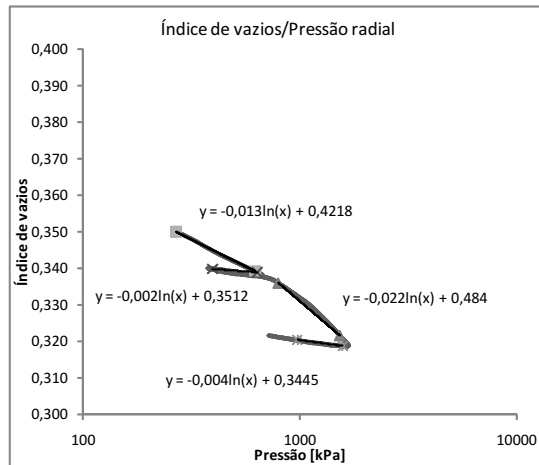




Provete 28-05					
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	e	n
1500,23	1254,79	245,44	727,79	0,337	0,252

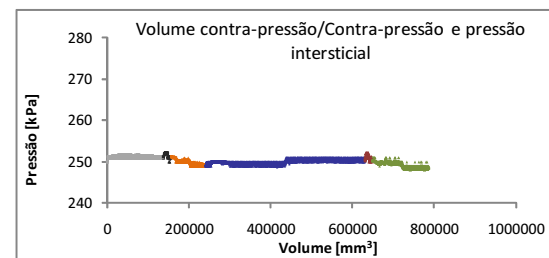
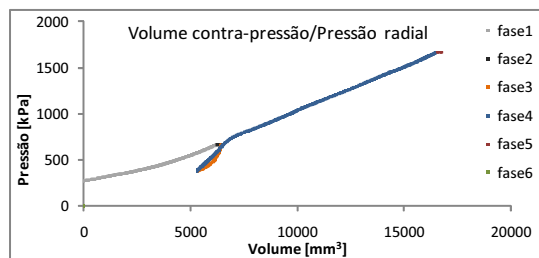
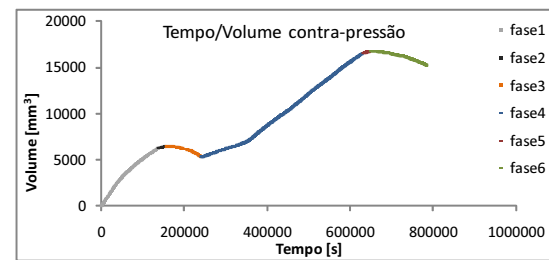
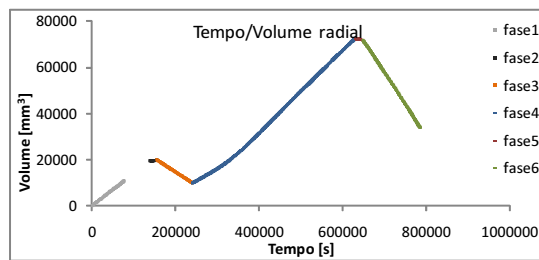
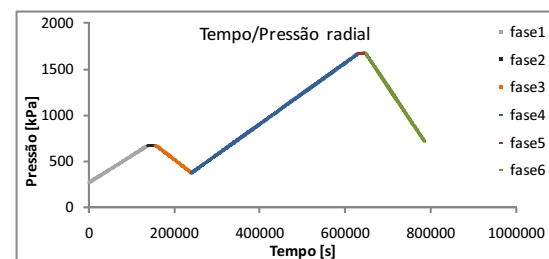
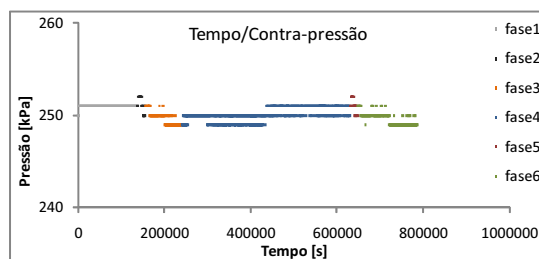
Provete 28-05						
A1	K1	A2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,028	-0,005	-0,024	-0,002	5,60	12,00	0,3817





Provete 29-13				
Provete molhado (g)	Provete seco (g)	Massa de água (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	e final
1417,92	1189,32	228,6	712,05	0,321

Provete 29-13						
λ1	K1	λ2	K2	Razão 1	Razão 2	e inicial
-0,013	-0,002	-0,022	-0,004	6,50	5,50	0,35



## Anexo V

### Calibração do conbel

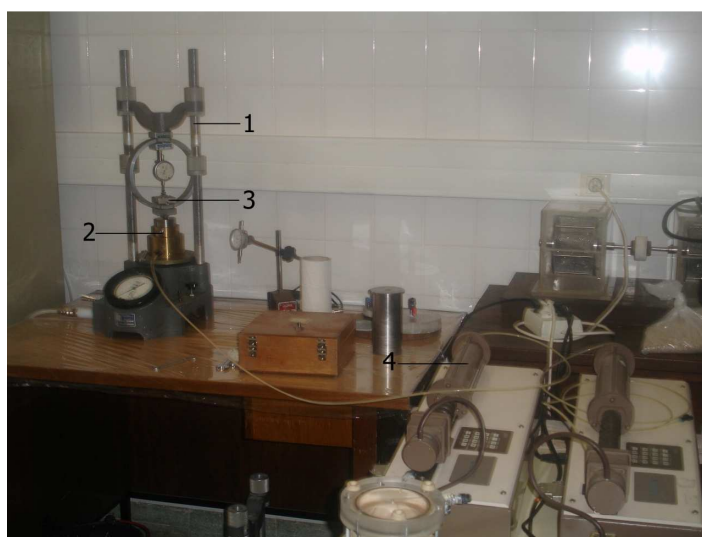
Para a utilização deste sistema foi necessário proceder à sua calibração e verificação do estado de funcionamento do AHF, recorrendo para comparação, em paralelo, a um êmbolo hidráulico actuado por um controlador de pressão e a uma célula de carga de elevada sensibilidade.

Objectivo: Relação entre a pressão nominal aplicada pelo AHF e a força exercida pelo respectivo prato.

Equipamentos: Um actuador hidráulico de força (AHF), um servo-controlador de pressão GDS, um êmbolo hidráulico, uma célula de carga de elevada sensibilidade.

Técnica experimental: Aplicação de sucessivos patamares de pressão no AHF e leitura da força desenvolvida no anel de carga e da pressão desenvolvida no êmbolo hidráulico (através do transdutor de pressão do controlador GDS, colocado em modo volume constante).

Arranjo experimental: A célula de carga, o êmbolo e o actuador hidráulico de força conbel foram dispostos em série, conforme representado na Figura 1. Colocação do êmbolo hidráulico no prato do actuador hidráulico de força (AHF), ligação do controlador GDS ao êmbolo hidráulico. Colocação da célula de carga entre o êmbolo hidráulico e o pistão do actuador hidráulico de força.

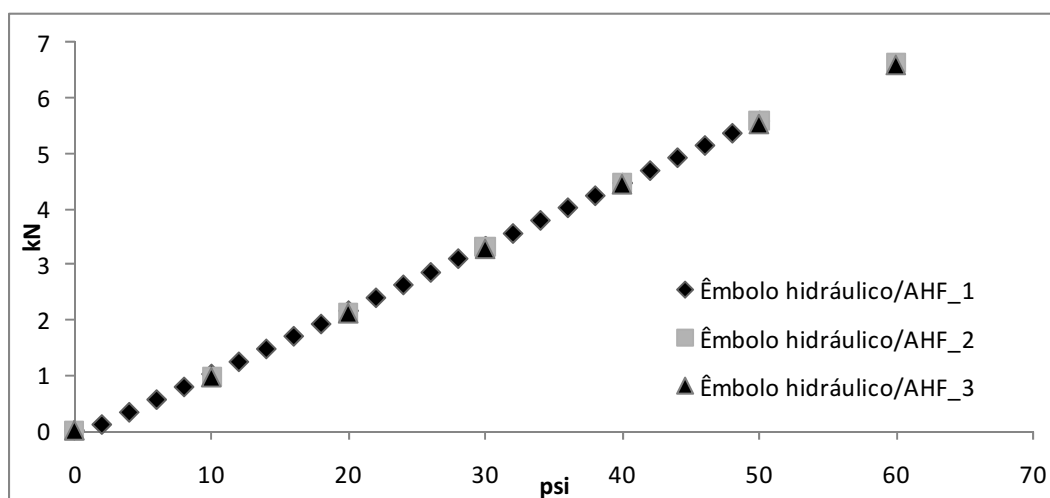


**Figura 1 - Esquema experimental de calibração do actuador hidráulico de força (AHF)**

Legenda: 1-Actuador hidráulico de força (AHF), 2-Êmbolo hidráulico, 3-Célula de carga, 4-Controlador GDS

Com o sistema de ligação do controlador GDS ao êmbolo hidráulico (saturado com água dearificada) na situação de fechado, registou-se três séries (AHF\_1, AHF\_2 e AHF\_3) do valor de pressão que é aplicada ao êmbolo hidráulico no controlador, conforme o aumento da pressão (expressa em psi) do actuador hidráulico de força (AHF), convertendo em força aplicada no êmbolo hidráulico e no pedestal da câmara. Registou-se apenas uma série (AHF\_4) de valores da célula de carga conforme o aumento de pressão (expressa em psi) aplicado no actuador hidráulico de força (AHF), definindo uma relação directa entre a força em Newton da célula e pressão (expressa em psi) do actuador hidráulico de força (AHF).

Resultados: Obteve-se os valores da célula de carga conforme a pressão (expressa em psi) aplicada no actuador hidráulico de força (AHF), definindo uma relação directa entre a pressão (expressa em psi) do actuador hidráulico de força (AHF) e a força em Newton da célula e a pressão no êmbolo hidráulico. A força no êmbolo hidráulico foi determinada pela multiplicação da área nominal interior do êmbolo ( $40 \text{ cm}^2$ ) com a pressão lida no controlador.



**Gráfico 1 – Relação de força entre êmbolo hidráulico e AHF**

Conclusão: Do Gráfico 1 verifica-se uma relação directa e linear entre a pressão aplicada pelo actuador hidráulico de força (AHF) e a força resultante da pressão desenvolvida no êmbolo hidráulico, calibrando o funcionamento do AHF, garantindo confiança na aplicação de pressões.

A tensão equivalente aplicada no provete de areia na câmara (tensão vertical de confinamento) foi determinada pela divisão da força aplicada pela área nominal no interior do pedestal ( $71 \text{ cm}^2$ ).

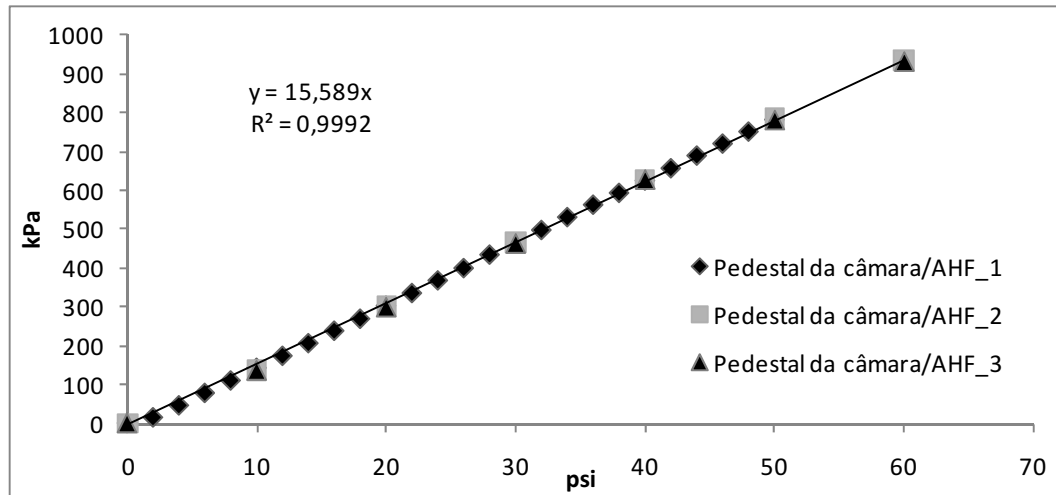


Gráfico 2 – Relação de força entre AHF e pressão no pedestal

Conclusão: Do Gráfico 2 obtêm-se uma relação directa entre a pressão exercida pelo actuador hidráulico de força e a tensão vertical de confinamento aplicada na área transversal da câmara de ensaio, calibrando o funcionamento do AHF com o pedestal da câmara, garantindo confiança na aplicação de pressões. A constante de conversão é de 15,589 kPa/psi.

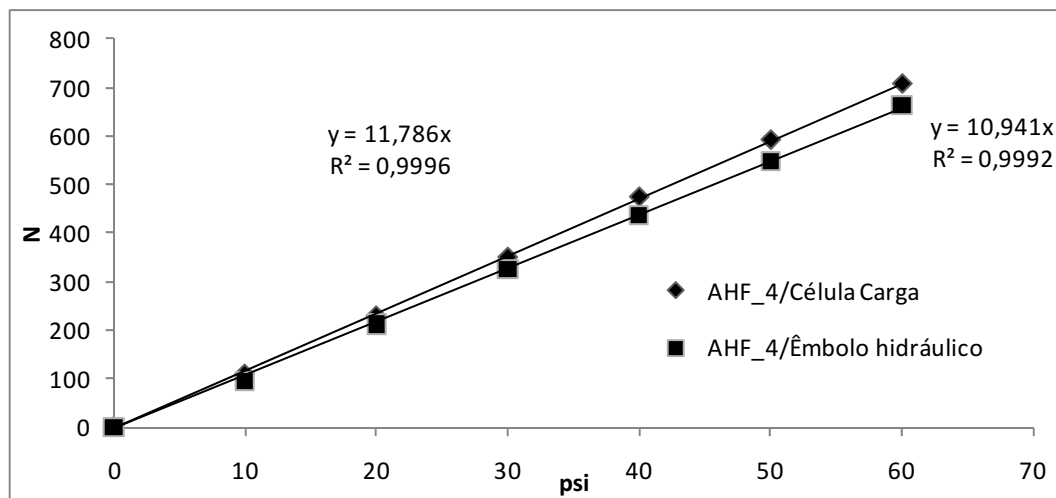
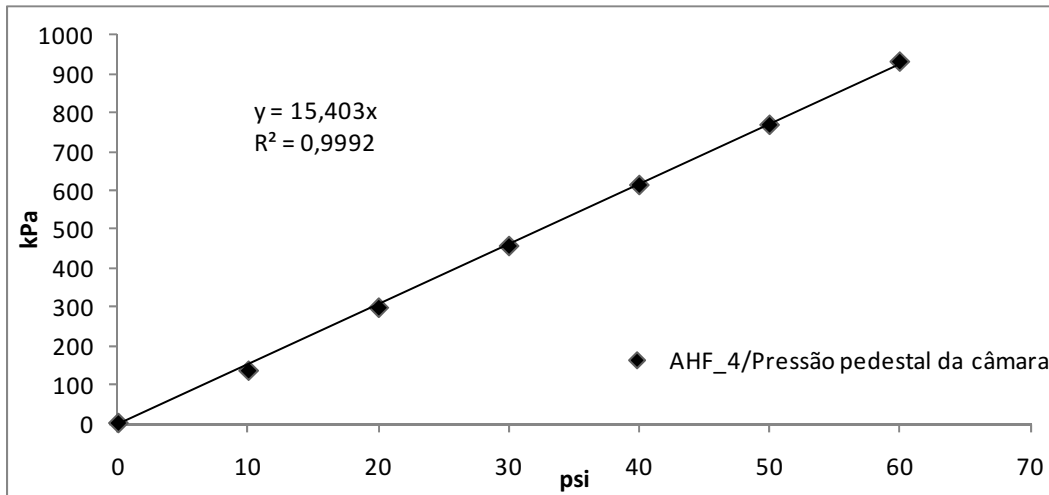


Gráfico 3 – Relação de AHF com célula de carga e êmbolo hidráulico

Adicionalmente procedeu-se à calibração directa da força resultante da pressão pneumática no conbel através da sua medição num anel dinamométrico de elevada sensibilidade. Os resultados resumem-se no Gráfico 3.



**Gráfico 4 – Relação entre pressão pneumática e tensão vertical de confinamento**

A constante de conversão entre pressão pneumática e tensão vertical de confinamento é de 15.403 kPa/psi, Gráfico 4.

Dos vários dados retirados da experimentação, obteve-se gráficos que demonstram as várias evoluções das relações, que serão utilizados para a definição da carga a aplicar a câmara, conforme a pressão definida no actuador hidráulico de força (AHF). Estando assim verificado e devidamente calibrado o sistema de carga que é aplicado ao solo.

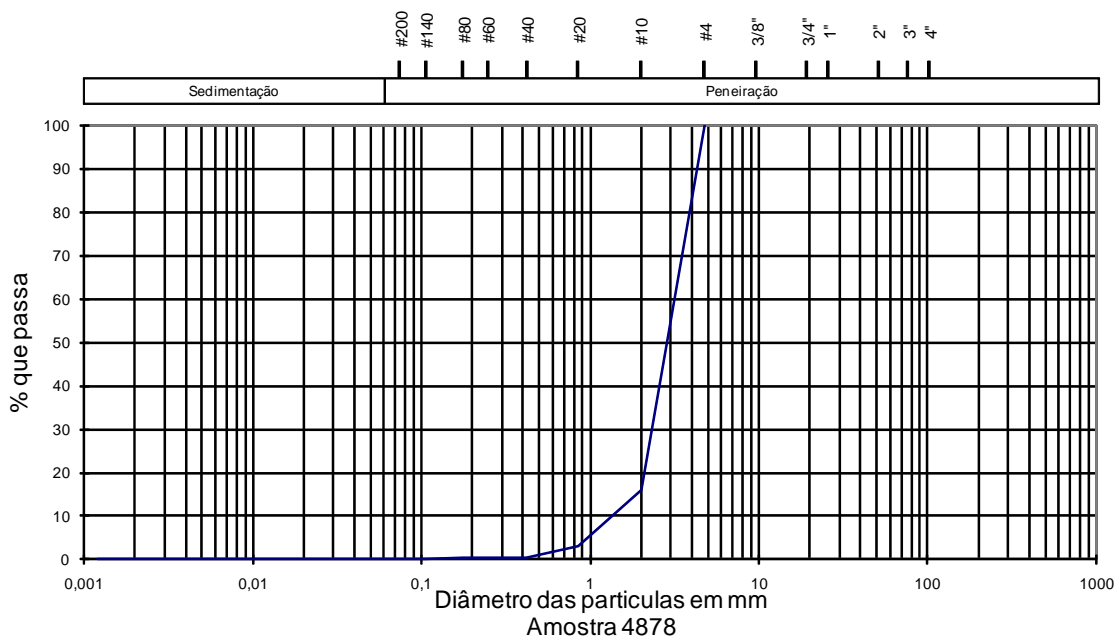
Obtêm-se uma relação directa entre a pressão aplicada (expressa em psi) no actuador hidráulico de força (AHF) e a força aplicada ao solo no interior da câmara, aplicando a equação da recta que relaciona as duas grandezas sabe-se que a pressão definida corresponde directamente à uma força aplicada no solo, podendo assim definir-se valores.

## Anexo VI

### Granulometria

Amostra 4878

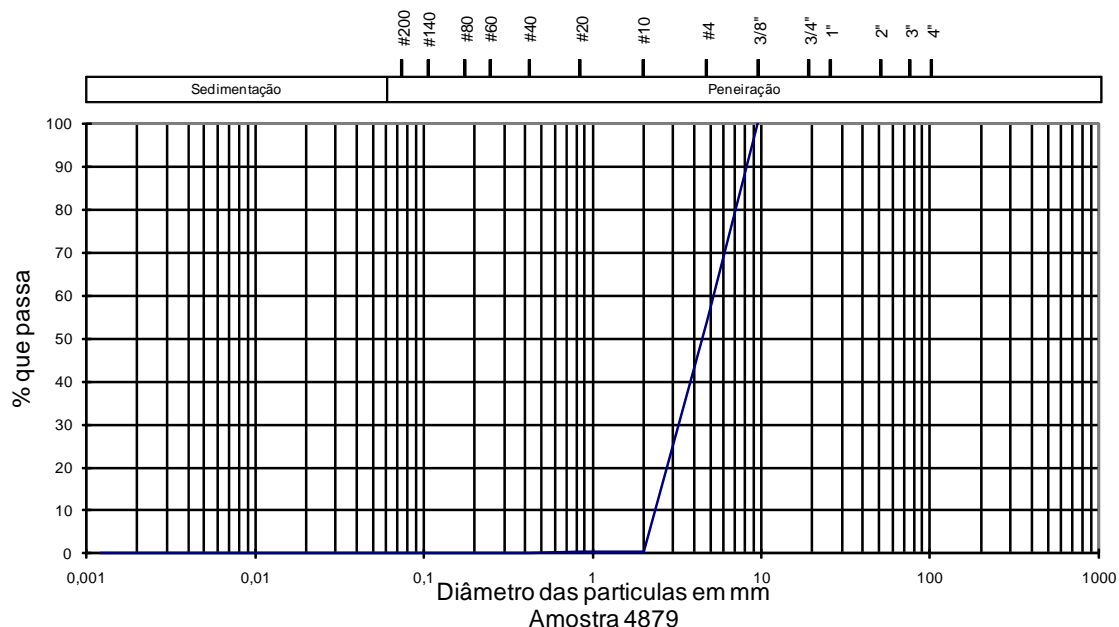
Laboratório Nacional de engenharia Civil									
Núcleo de Barragens e Obras de Aterro			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA			Amostra nº		4878	
Nº do peneiro	2"	1"	3/4"	3/8"	4	10			
Malha (mm)	50,8	25,4	19,1	9,52	4,76	2			
Peso do material retido		0	0	0	0	1467,06			
% do material retido	0	0	0	0,00	0,00	83,87			
% acumuladas retidas	0	0	0	0,00	0,00	83,87			
Dados para sedimentação	100	100	100	100,00	100,00	16,13			
Peso total da amostra						Pt	1749,31	g	
Peso do material retido no peneiro 10						P1	1467,06		
Peso do material passado no peneiro 10						P2	282,25		
Porcentagem de finos						Nf	16,13		
Sedimentação		Água oxigenada			cm3	Fervura			15min
Proveta Nº		Antifloculante			cm3	Agitação			15min
	Menisco	c=		humidade higroscópica			Ps=		
Correcções							Pa=		
	antifloculante	c'=							
Peso específico dos grãos		G=		provete seco ao ar		PA		g	
Temp. média do ensaio	°C	T=		provete seco		Ps=Pa*(Ps/Pa)			
	K=	A=100/Ps*G/G-1							
3 - Peneiração fina									
Nº do peneiro	20	40	60	80	140	200			
Malha	0,84	0,42	0,25	0,177	0,105	0,074			
Peso do material retido	227,16	45,91	3,47	0,5	0,64	0,3			
% do material retido	12,99	2,62	0,20	0,03	0,04	0,02			
% referentes ao total									
% acumuladas retidas	96,85	99,48	99,67	99,70	99,74	99,76			
Sedimentação	3,15	0,52	0,33	0,30	0,26	0,24	100		



Argila	Finos	Médios	Grossos	Finas	Médias	Grossas	Finos	Médios	Grossos	Finos	Médios
	Siltes			Areias			Cascahos			Blocos	

Amostra 4879

Laboratório Nacional de engenharia Civil							
Núcleo de Barragens e Obras de Aterro			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA			Amostra nº 4879	
Nº do peneiro	2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	
Malha (mm)	50,8	25,4	19,1	9,52	4,76	2	
Peso do material retido		0	0		602,26	700,23	
% do material retido	0	0	0	0,00	45,99	53,47	
% acumuladas retidas	0	0	0	0,00	45,99	99,46	
Dados para sedimentação	100	100	100	100,00	54,01	0,54	
Peso total da amostra						Pt	1309,58 g
Peso do material retido no peneiro 10						P1	1302,49
Peso do material passado no peneiro 10						P2	7,09
Percentagem de finos						Nf	0,54
Sedimentação		Água oxigenada			cm3	Fervura	15min
Proveta Nº		Antifloculante			cm3	Agitação	15min
	Menisco	c=		humidade higroscópica		Ps=	g
Correcções						Pa=	g
	antifloculante	c'=					
Peso específico dos grãos		G=		provetes seco ao ar		PA	g
Temp. média do ensaio	°C	T=		provetes seco		Ps=Pa*(Ps/Pa)	
	K=	A=100/Ps*G/G-1					
3 - Peneiração fina							
Nº do peneiro	20	40	60	80	140	200	
Malha	0,84	0,42	0,25	0,177	0,105	0,074	
Peso do material retido	3,35	0,12	0,11	0,08	0,23	0,19	
% do material retido	0,26	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	
% referentes ao total							
% acumuladas retidas	99,71	99,72	99,73	99,74	99,76	99,77	
Sedimentação	0,29	0,28	0,27	0,26	0,24	0,23	100



Argila	Finos	Médios	Grossos	Finas	Médias	Grossas	Finos	Médios	Grossos	Finos	Médios
	Siltes			Areias			Cascalhos			Blocos	



## Anexo VII

### Fichas de ensaios do peso volúmico

Amostra 4878

Processo N.º		Amostra N.º	4878	Data	08-07-2010
Ensaio - Peso Volúmico					
Aparelho N.º					
Massa do Molde [g]	4673				
Volume do Molde [cm³]	947				

Ensaio					
Dia	Hora (min.)	Massa do Conjunto [g]	Massa do Solo [g]	Massa Volumica (g/cm³)	Massa Volumica (kN/m³)
08-09-2010		6097	1424	1,50	14,75
08-09-2010		6104	1431	1,51	14,82
08-09-2010		6098	1425	1,50	14,76

Média	14,78	kN/m³
-------	-------	-------

Amostra 4879

Processo N.º		Amostra N.º	4879	Data	08-07-2010
Ensaio - Peso Volúmico					
Aparelho N.º					
Massa do Molde [g]	4673				
Volume do Molde [cm³]	947				

Ensaio					
Dia	Hora (min.)	Massa do Conjunto [g]	Massa do Solo [g]	Massa Volumica (g/cm³)	Massa Volumica (kN/m³)
08-09-2010		6076	1403	1,48	14,53
08-09-2010		6068	1395	1,47	14,45
08-09-2010		6076	1403	1,48	14,53

Média	14,51	kN/m³
-------	-------	-------



## Anexo VIII

### Desenhos do equipamento

